

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE BELLAS ARTES



TESIS DOCTORAL

**Aplicación de la tecnología 3D a las técnicas de
documentación, conservación y restauración de Bienes
Culturales**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

María Ávila Rodríguez

Directores

Sonia Santos Gómez
Markus Bastir

Madrid
Ed. electrónica 2019

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE BELLAS ARTES



**APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA 3D A LAS TÉCNICAS DE
DOCUMENTACIÓN, CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN DE
BIENES CULTURALES**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR:

María Ávila Rodríguez

Bajo la dirección de:

Sonia Santos Gómez

Markus Bastir

Madrid, 2018



UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE BELLAS ARTES

*Aplicación de la tecnología 3D a las técnicas de documentación,
conservación y restauración de bienes culturales*

Memoria que para optar al grado de doctora presenta

MARÍA ÁVILA RODRÍGUEZ

Directores:

SONIA SANTOS GÓMEZ

MARKUS BASTIR

Madrid, 2018

*Aplicación de la tecnología 3D a las técnicas de documentación,
conservación y restauración de bienes culturales*

María Ávila Rodríguez

A las mujeres de mi familia

Agradecimientos

La investigación realizada sobre las aplicaciones que las tecnologías 3D presentan en el ámbito de la documentación, conservación y restauración de los bienes culturales constituye la culminación del trabajo fin de máster que realicé en el curso académico 2013/2014. El trabajo, titulado *El facsímile escultórico como medida de conservación preventiva* y dirigido también por la doctora Sonia Santos Gómez, despertó en mí una inmensa necesidad de conocer más sobre los usos y posibilidades que estas tecnologías 3D presentan en el campo de la conservación del patrimonio, por lo que decidí embarcarme en ampliar dicha investigación mediante la realización de esta tesis doctoral.

Me gustaría comenzar agradeciendo al Dr. Markus Bastir, codirector de la tesis, la confianza que depositó en mí al dejarme entrar en su laboratorio y permitirme trabajar con las importantes piezas en las que investigaba junto a su equipo.

Por supuesto, no me olvido del resto de compañeros del CSIC, en especial de Alberto Riesco López, que resolvió numerosas dudas referentes a fósiles y huesos, respondiendo a mis preguntas y consideraciones con paciencia, siempre dispuesto a colaborar conmigo con la mejor de sus sonrisas, consiguiendo que realmente haya podido adquirir ciertos conocimientos sobre paleobiología. También estoy profundamente agradecida a Francisco Javier Fernández Pérez, que no cesó de imprimir y reimprimir las piezas hasta conseguir los resultados que precisaba la investigación, de modo que resultaran lo más perfectas posible, parando para ello el resto de su trabajo como técnico del laboratorio.

Del mismo modo, quiero expresar mi gratitud hacia la empresa Factum Arte, en concreto a Carlos Bayod Lucini, responsable de los escaneados láser 3D. Carlos ha continuado colaborando con esta investigación todos estos años a pesar de que mis prácticas del máster en la empresa finalizaron en 2014. Él ha estado siempre dispuesto ante mis demandas de atención expresadas en los correos que he ido enviándole y ha solventado numerosas dudas que han ido surgiendo sobre los trabajos desarrollados por la empresa que han sido descritos en la presente tesis doctoral.

Quisiera también agradecer a Alejandra Gómez Martín, conservadora del Museo de la Farmacia Hispana su amabilidad y disponibilidad para dejarme acceder a la obra del Museo siempre que así lo necesitase, facilitándome en la medida de lo posible, el desarrollo del trabajo en la institución.

Igualmente, agradezco a Paloma Albalá Rodríguez, de la Secretaría de Alumnos de la Facultad de Bellas Artes de la Universidad Complutense de Madrid, su entrega y excelente labor a la hora de informar siempre con paciencia y eficacia sobre todos los trámites y gestiones a realizar.

Como no podía ser de otro modo, agradezco a Carlos Romero Barruete, técnico de mantenimiento del taller de restauración de escultura de la Facultad, haber documentado tan fielmente la antorcha en 2010. Carlitos es, además, la alegría del taller cada día.

Infinitamente agradecida me muestro a Luis Gracia Pérez, fundador de la empresa D3D Digitalización 3D, que aportó desinteresadamente su escáner para digitalizar la pieza de Valencia, desplazándose desde Madrid hasta allí a pesar de que su mujer iba a dar a luz en esos días. También contribuyó a solventar algunas dudas que fueron surgiendo sobre diversos aspectos del escaneado 3D.

Por supuesto, agradezco a aquellos organismos que enviaron documentación sobre alguna de las copias de la escultura *Los Portadores de la Antorcha*. En especial debo agradecer a la Biblioteca Mark Twain en Connecticut, en concreto a su directora Beth Dominiani y a Sandy O'Reily, miembro temporal de su plantilla, por las fotografías aportadas y la disposición a colaborar con la investigación. Por otro lado, agradecer también a Melanie Neil, secretaria adjunta del Chrysler Museum of Art de Norfolk en Virginia, el suministro de información sobre la escultura aportado y las 15 fotografías de la antorcha enviadas. A Stephen Baumann, del Discovery Museum de Bridgeport de

Connecticut, se le agradece la colaboración y amabilidad por contestar a los correos enviados, a pesar de no haber podido enviarnos documentación por que la obra había sido vendida a un coleccionista particular. También me gustaría agradecer a Mireya Arenas Patiño la desinteresada ayuda que me brindó en la realización de las fotografías tomadas en el Museo de la Farmacia Hispana, colaborando conmigo una vez más, como muestra de nuestra amistad.

Asimismo, quisiera resaltar el apoyo brindado por mis amigas, muy especialmente a mis queridas Belén, Adriana y Paulina, que me han apoyado estos últimos años. Las tres en especial me han escuchado y apoyado en todos los problemas y dificultades que surgieron, han entendido mis ausencias y me han ayudado en mis momentos de desánimo, consiguiendo que el camino haya sido siempre más fácil. Les agradezco por encima de todo que creyeran en mí desde el inicio de esta investigación.

A mi familia agradezco el ánimo brindado, en especial a mi madre, por enseñarme lo que es el esfuerzo, a mi padre, por hacerme siempre reír y a mi abuela, por enseñarme a luchar.

Me gustaría también agradecer a la pequeña Martina de mi corazón esos momentos en los que me ha invitado con su sonrisa a aparcarse la tesis unos instantes, sustituyendo el teclado del ordenador por lápices de colores y cuadernos para colorear, consiguiendo, sin ella saberlo, hacer descansar mi mente y ser de nuevo una niña sin obligaciones.

Sin embargo, he de decir que dos son las personas que merecen mi más profundo agradecimiento puesto que sin ellas este trabajo difícilmente habría sido concluido:

En primer lugar y como no podría ser otro modo, a la Dra. Sonia Santos Gómez, directora de la presente tesis doctoral. Difícilmente puedo en estas breves líneas expresar mi gratitud hacia ella. Sin ella, este trabajo probablemente no se habría iniciado, puesto que no sólo despertó en mí el gusto por la investigación y la buena *praxis*, sino que ha sido, desde que comenzó a enseñarme en mi licenciatura, la profesora más entregada que he conocido. Gracias a su inmensa labor como profesora y directora, creo en la existencia

de la verdadera vocación docente. Sonia ha sido mi fiel compañera durante estos años y no exagero si afirmo que ha estado disponible y entregada a la dirección de esta tesis, prácticamente las 24 horas del día: no podría haber tenido mejor dirección que la suya.

Por otro lado, debo un profundo agradecimiento a mi compañero Carles, que con infinita paciencia me ha proporcionado el ánimo y cariño necesarios para avanzar en esta investigación. Cuando se me apagó la luz hace ya casi 3 años, él me la encendió de nuevo, consiguiendo que siempre se mantenga ya así. Sólo yo comprendo lo necesaria que ha sido su ayuda en el día a día.

A todos ellos, gracias de corazón.

ÍNDICE:

RESUMEN/ABSTRACT	21
INTRODUCCIÓN	25
 PARTE I- TECNOLOGÍAS 3D: REGISTRO, MODELADO E IMPRESIÓN	 29
 Capítulo 1. Registro de la superficie	 31
1. 1 Antecedentes	31
1. 2 Metodología tradicional de registro empleada en la actualidad	39
1. 2. 1 Sistemas y materiales de moldeo	39
1. 2. 2 Tipos de molde	40
1. 2. 2. 1 Materiales más empleados en la elaboración de moldes: yeso, silicona	42
1. 3 Empleo de las nuevas tecnologías	50
1. 3. 1 Escáneres tridimensionales de superficie	53
1. 3. 1. 1 Proceso de escaneado	55
1. 3. 1. 1. 1 Calibrado del equipo	55
1. 3. 1. 1. 2 Registro	57
1. 3. 1. 1. 3 Procesado	59
1. 3. 1. 2 Clasificación de los escáneres empleados en patrimonio	64
1. 3. 1. 2. 1 Escaneado de corto alcance	65
1. 3. 1. 2. 1. 1 Escáner de luz láser	65

1. 3. 1. 2. 1. 2 El escaneado 3D de luz estructurada	70
1. 3. 1. 2. 2 Escáneres 3D de largo-medio alcance (LIDAR)	73
1. 3. 1. 3 Texturizado del modelo	74
1. 4 Fotogrametría	76
1. 4. 1 Definición y clasificación	77
1. 4. 2 Antecedentes de la fotogrametría	79
1. 4. 3 Proceso fotogramétrico	83
1. 4. 3. 1 Planteamiento y captura de las imágenes	83
1. 4. 3. 2 Cámara e imágenes	86
1. 4. 3. 3 Softwares fotogramétricos	87
1. 4. 3. 3. 1 Softwares de cálculo en la nube	88
1. 4. 3. 3. 2 Softwares de escritorio	89
1. 4. 3. 4 Registro del levantamiento	92
1. 4. 3. 5 Fotogrametría involuntaria	93
1. 4. 4 Escáneres <i>versus</i> fotogrametría	94
Capítulo 2. Modelado y post-procesado 3D del modelo	97
2. 1 Antecedentes. Sistemas DA y modelado sólido	98
2. 1. 1 Conceptos básicos del DA	107
2. 1. 2 Dibujar en DA	110
2. 1. 2. 1 Sistema de coordenadas	111
2. 1. 2. 2 Edición básica	112
2. 1. 2. 3 Visualización en DA	113
2. 1. 2. 4 DA y modelado de sólidos 3D	113

2. 2 Proceso del modelado 3D	116
2. 2. 1 Conceptos básicos del modelado	116
2. 3 Operaciones y herramientas	119
2. 3. 1 Creación y edición de los modelos	119
2. 3. 2 Esculpido 3D	122
2. 3. 3 Importación de imágenes y planimetrías	125
2. 3. 4 Texturizado	127
2. 3. 5 Renderizado	129
2. 3. 6 Animación y rigging	133
2. 4 Post-procesado del modelo 3D	136
2. 5 Programas de Modelado 3D y postprocesado	139
2. 5. 1 Blender	141
2. 5. 2 Autodesk	142
2. 5. 3 Geomagic	146
2. 5. 4 Meshlab	147
2. 5. 5 Sketchup	148
2. 5. 6 Z-brush y Sculptris	149
 Capítulo 3. Reproducción e impresión de los datos	 151
3. 1 Antecedentes de reproducción e impresión de los datos	151
3. 1. 1 Metodología y materiales tradicionales de realización de vaciados empleados en la actualidad	 152
3. 1. 2 Técnicas sustractivas: mecanizado	156
3. 1. 3 Técnicas aditivas: fabricación por capas	162
3. 1. 3. 1 Evolución y técnicas FC	166
3. 1. 3. 1. 1 Materiales líquidos	167

3. 1. 3. 1. 2 Materiales sólidos	170
3. 1. 3. 1. 3 Materiales en polvo	172
3. 2 Sistemas empleados en la actualidad y las impresoras 3D	175
3. 2. 1 Formatos de impresión y preparación del archivo	176
3. 2. 2 Máquinas herramienta y robots	178
3. 2. 3 Manufactura por capas e impresoras 3D	180
3. 2. 3. 1 Materiales para la génesis del modelo 3D	191
3. 2. 3. 2 Tratamientos post-impresión	196
3. 3 Aplicación de las impresoras 3D en los diferentes ámbitos de la vida diaria del ser humano	200

PARTE II- APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA 3D A LAS TÉCNICAS DE DOCUMENTACIÓN, CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN DE BIENES CULTURALES205

Capítulo 4. Documentación 3D del patrimonio: bases de datos y sistemas de monitorización	207
4. 1 Documentación	208
4. 1. 1 Tipos de documentación	215
4. 1. 1. 1 Documentación gráfica del patrimonio cultural	216
4. 1. 1. 2 Documentación 3D del patrimonio cultural	219
4. 1. 2 Bases de datos	234
4. 2 Sistemas de monitorización del patrimonio	250
4. 3 Importancia de la documentación para el patrimonio perdido	260

Capítulo 5. Restauración virtual y restauración tradicional apoyada por las tecnologías 3D	267
5. 1 ¿Qué es la restauración virtual?	268
5. 2 Técnicas de restauración virtual y empleo de las tecnologías 3D en restauración tradicional	271
5. 2. 1 La anastilosis y la anastilosis virtual	271
5. 2. 2 Reintegración volumétrica y cromática empleando las técnicas 3D	274
5. 2. 2. 1 Reintegración volumétrica de obras de arte digital	276
5. 2. 3 Reconstrucciones virtuales en patrimonio	284
5. 2. 4 Restauración virtual de fósiles	286
5. 3 Ejemplos de restauraciones realizadas en patrimonio empleando tecnologías 3D	291
5. 3. 1 Ejemplos de anastilosis virtual	291
5. 3. 2 Ejemplos de reintegración volumétrica y cromática empleando las técnicas 3D	297
5. 4 Ejemplos de restauraciones virtuales no materializadas. Opciones de representación	303
 Capítulo 6. Empleo de las tecnologías 3d para la realización de reproducciones del patrimonio cultural	 335
6. 1 Copia, facsímil, reproducción y réplica. Definiciones y antecedentes	335
6. 1. 1 El concepto y valor de “lo original”	345
6. 2 Aplicaciones y ejemplos del empleo de reproducciones	351
6. 2. 1 Exposición de la reproducción mientras el bien cultural original necesita un cambio de ubicación	355
6. 2. 2 Conservación del original en su lugar habitual de exhibición cuando se realiza un préstamo a otra institución	35

6. 2. 3 Conservación adecuada de las obras guardándolas y/o preservándolas en una zona climatizada	357
6. 2. 4 Difusión de las obras	372
6. 2. 5 Restitución de partes originales que se han de guardar separadas o bien se han perdido	377
6. 2. 6 Garantizar el testimonio histórico material de las piezas	380
6. 2. 7 Repatriación de las obras en casos de conflictos	386
6. 2. 8 Reagrupar y reconstruir obras	393
 Capítulo 7. Utilización de las tecnologías 3d para la divulgación, didáctica e investigación del bien cultural	397
7. 1 Antecedentes: ilustraciones	398
7. 2 Utilización de la tecnología 3D en la realización de visualizaciones y recreaciones	402
7. 2. 1 Pdf 3D y visores web	412
7. 2. 2 Realidad virtual	415
7. 2. 2. 1 Lenguaje de modelado de realidad virtual	418
7. 2. 2. 2 Realidad aumentada	419
7. 2. 2. 3 Arqueología virtual	423
7. 3 Utilización de la tecnología 3D en los museos para fines didácticos y expositivos	430
7. 3. 1 Museos virtuales	433
7. 3. 2 Museos, exposiciones y otros recursos para invidentes	447
7. 4 Tecnología 3D aplicada en proyectos de divulgación, didáctica e investigación de bienes culturales	451

Capítulo 8. Legislación y normativa de patrimonio	465
8. 1 Introducción	465
8. 2 Revisión de las leyes y cartas referentes a las diferentes aplicaciones de la tecnología 3D en el ámbito del patrimonio	470
8. 2. 1 Los derechos de autor	471
8. 2. 2 Documentación del patrimonio cultural	476
8. 2. 3 Restauración virtual de la obra de arte	480
8. 2. 4 Falsificaciones, copias y facsímiles o reproducciones	486
8. 2. 5 Divulgación, didáctica e investigación	490
 Capítulo 9. Estudio de casos. Resultados obtenidos	497
9. 1 Estudio de casos realizados en el CSIC	501
9. 1. 1 Cráneo de <i>Homo Naledi</i>	503
9. 1. 2 El tórax	525
9. 1. 3 Las columnas vertebrales	536
9. 1. 3. 1 Columnas de dos individuos actuales y la del niño de Narikotome	540
9. 1. 3. 2 Futuras investigaciones	552
9. 2 Estudio de casos realizados a través de la UCM	557
9. 2. 1 Proyecto nº 1: <i>Incorporación de la tecnología 3D a las enseñanzas de las asignaturas de conservación- restauración de bienes culturales y a las vinculadas al ámbito escultórico</i>	558
9. 2. 1. 1 Desarrollo del Proyecto	560
9. 2. 1. 1. a Selección de las piezas	560
9. 2. 1. 1. b Escaneado de las piezas	561
9. 2. 1. 1. c Impresión de las piezas	569

9. 2. 1. 1. d Realización de los facsímiles del <i>trilobite</i> y la <i>terra sigillata</i>	579
9. 2. 1. 1. e El modelo de la vértebra	594
9. 2. 1. 1. f La fundación de la medala	595
9. 2. 1. 1. g Los videos	596
9. 2. 1. 2 Resultados del proyecto	597
9. 2. 2 Proyecto nº 2: <i>Aplicación de la tecnología 3D a la conservación de arte contemporáneo como solución al robo y desaparición de fragmentos de esculturas. Caso de estudio: Los Portadores de la Antorcha</i>	599
9. 2. 2. 1 <i>Aplicación de la tecnología 3D a la conservación de arte contemporáneo como solución al robo y desaparición de fragmentos de esculturas. Caso de estudio: Los Portadores de la Antorcha</i>	600
9. 2. 2. 1. 1 Desarrollo del proyecto	608
9. 2. 2. 2 <i>Aplicación de la tecnología 3D a la conservación de arte contemporáneo como solución al robo y desaparición de fragmentos de esculturas. Caso de estudio: Los Portadores de la Antorcha (Parte II)</i>	627
9. 2. 2. 2. 1 Desarrollo del proyecto	628
9. 2. 2. 3 Resultado del proyecto	655
9. 2. 3 Intervención en la Facultad de Farmacia	657
9. 2. 3. 1 Creación y edición de los modelos 3D	664
9. 2. 3. 1. 1 Creación y edición del modelo de la estrella grande completa	667
9. 2. 3. 1. 2 Creación y edición del modelo de la estrella pequeña completa	669
9. 2. 3. 1. 3 Creación y edición del modelo de la estrella nº1	671

9. 2. 3. 1. 4 Creación y edición del modelo de la estrella nº2	674
9. 2. 3. 1. 5 Creación y edición del modelo de la estrella nº3	676
9. 2. 3. 2 Restauración virtual de las piezas	679
9. 2. 3. 2. 1 Restauración virtual de la pieza nº1	680
9. 2. 3. 2. 2 Restauración virtual de la pieza nº2	682
9.2. 3. 2. 3 Restauración virtual de la pieza nº3	684
9. 2. 3. 3 Impresión de las piezas	686
9. 2. 3. 4 Moldeo y vaciado de las piezas impresas	689
9. 2. 3. 5 Reintegración volumétrica física de los originales ...	697
9. 2. 3. 6 Resultados de la intervención	699
 Capítulo 10. Conclusiones	 701
 GLOSARIO DE ACRÓNIMOS Y ABREVIACIONES	 713
GLOSARIO DE TERMINOLOGÍA	717
REFERENCIAS	725
ÍNDICES DE FIGURAS Y TABLAS	821

RESUMEN/ABSTRACT

Aplicación de la tecnología 3D a las técnicas de documentación, conservación y restauración de bienes culturales

Las nuevas tecnologías se encuentran cada vez más inmersas en la vida cotidiana de los seres humanos. De este modo, la tecnología 3D forma hoy parte de su entorno y como no podía ser de otro modo, el ámbito patrimonial también se hace eco de los avances que esta supone. Sin embargo, precisamente por ser tan reciente, los estudios llevados a cabo hasta la fecha sobre las aplicaciones que estas tecnologías presentan en las tareas enfocadas a salvaguardar el patrimonio, son aún escasos. Por ello, la presente tesis doctoral contempla paliar este déficit de información, centrándose en el estudio, puesta en valor y justificación de la tecnología 3D aplicada a las tareas de documentación, conservación y restauración de los bienes culturales. Explicar dichas aplicaciones, que se comprenda su utilidad por parte del lector y desarrollar diferentes metodologías de trabajo que constituyan pautas de actuación para obras de características similares, constituyen los objetivos de la presente tesis doctoral.

Para todo ello, primeramente, se ha recopilado toda la información posible relevante a las nuevas tecnologías a utilizar, de modo que se comprenda en profundidad su funcionamiento y tipologías. Se ha ilustrado, además, con numerosos ejemplos, su aplicación al ámbito patrimonial mediante la exposición de las actuaciones realizadas por diferentes profesionales y expertos del patrimonio. Otra parte fundamental de la tesis constituye la explicación de los protocolos de actuación necesarios ante cualquier intervención en la que se apliquen estas técnicas 3D, así como las normativas y cartas relevantes para el objeto de estudio. En este contexto, son también estudiados los derechos de autor, a fin de que dichas actuaciones se encuentren siempre dentro del marco legal vigente.

Dado que solo una documentación teórica no es suficiente para esclarecer las necesidades expuestas en la tesis, se marca otra vía de trabajo con el fin de obtener información relevante, concisa y de primera mano: la realización del estudio de diferentes casos que han permitido demostrar la vital importancia que estas técnicas 3D brindan a la hora de apoyar las técnicas más tradicionales o incluso, conseguir lo que sin ellas sería imposible. Con esta finalidad, se muestran diversos ejemplos que incluyen la conservación y difusión de bienes paleontológicos del CSIC, así como la conservación del patrimonio complutense, entre el que se encuentra la escultura pública *Los Portadores de la Antorcha* y la Farmacia Hispanoárabe del Museo de la Farmacia Hispana.

En estos estudios se ha experimentado con las tecnologías 3D más empleadas en patrimonio, pasando por digitalización, modelado e impresión 3D de diferentes modelos con diversos fines. De este modo, la combinación de las pruebas analíticas y los resultados obtenidos en el estudio de los diferentes casos sirven de sustento para la obtención de las conclusiones finales pertinentes, que llevan a esclarecer la utilidad que las tecnologías 3D tienen en la conservación-restauración del patrimonio y a establecer metodologías de trabajo extrapolables a otras obras con problemáticas de conservación similares.

Application of 3D technology to the techniques of documentation, conservation and restoration of cultural properties

New technologies are increasingly immersed in the daily life of human beings. In this way, 3D technology is now part of its environment and how could it be otherwise, the heritage area also echoes the advances that this entails. However, precisely because it is so recent, the studies carried out until now on the applications that these technologies present in tasks aimed at safeguarding heritage, are still scarce. Therefore, this doctoral thesis seeks to alleviate this information deficit, focusing on the study, value and justification of 3D technology applied to the tasks of documentation, conservation and restoration of cultural properties. Thus, explaining these applications, understanding their utilities by the reader and developing different work methodologies that constitute action guidelines for works of similar characteristics, constitute the objectives of this doctoral thesis.

For all this, firstly, all possible information relevant to the new technologies to be used has been compiled, so that its operation and typologies are deeply understood. It has been illustrated, in addition, with numerous examples, its application to the patrimonial field through the exhibition of the performances carried out by different heritage professionals and experts. Another fundamental part of the thesis constitutes the explanation of the action protocols necessary before any action and intervention involving these 3D techniques, as well as the regulations and letters relevant to the object of study. In this context, copyrights are also studied, so that the proceedings are always within the current legal framework.

As given only a theoretical documentation is not enough to clarify the needs exposed in the thesis, another working way is marked in order to obtain relevant, concise and first hand information: the realization of the study of different cases that have allowed to demonstrate the vital importance that these 3D techniques provide when it comes to supporting the most traditional techniques or even, achieving what without them would be impossible. Thus, several examples which include the conservation and dissemination of palaeontological properties of the CSIC are shown, as well as the conservation of the complutense heritage, among which is the public sculpture *Los Portadores de la Antorcha* and the Hispanoárabe Pharmacy of the Museo de la Farmacia Hispana.

In these studies, has been experimented with the 3D technologies most used in heritage, going through digitalization, modeling and 3D printing of different models with diverse purposes. In this way, the combination of the analytical tests and the results obtained in the study of the different cases, serve as support to obtain the pertinent final conclusions, which lead to clarify the utility that the 3D technologies have in the conservation-restoration of the heritage and to establish work methodologies that can be extrapolated to other works with similar conservation problems.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, las nuevas tecnologías están cada vez más inmersas en numerosos aspectos de la vida cotidiana de los seres humanos. Hace escasos años, hubiera sido inimaginable que detrás del más mínimo detalle de la vida del hombre las nuevas tecnologías fueran partícipes o incluso fundamentales, de manera que puede afirmarse que las técnicas 3D se encuentran, cada vez más, inmersas en nuestro entorno y dirigen el rumbo de las vidas de los seres humanos. La industria ha ido perfilando numerosas e innovadoras mejoras en las técnicas de modelado, digitalización e impresión 3D, de tal manera que son múltiples los campos que han visto incrementadas sus prestaciones gracias a su empleo y apenas existen ámbitos que no hayan experimentado esta mejora. Desde el minúsculo implante del dentista hasta las grandes piezas de una nave de la NASA se emplea, para su creación y materialización, esta tecnología 3D.

El desarrollo del ordenador personal y su más fiel aliado, internet, ha desembocado en la aparición de numerosas herramientas y tecnologías 3D que se encuentran disponibles y al alcance del público en general. Los avances informáticos crecen actualmente a pasos agigantados. A finales del s. XX eran necesarias décadas para conseguir importantes progresos en estas tecnologías, mientras que, actualmente, sólo con mirar cinco años atrás, los cambios son ya feroces. El mundo tecnológico actualmente evoluciona de un modo que parece no tener límites. Hoy en día, la sociedad vive asombrada por lo digital y las nuevas tecnologías, por lo que no es de extrañar que uno de los ámbitos que se encuentra en pleno auge en cuanto a la utilización de estas herramientas sea el referente al patrimonio cultural.

Las tecnologías 3D no solo están cambiando el modo de crear, puesto que el arte contemporáneo se nutre cada día de las nuevas tecnologías, sino que el patrimonio más antiguo, la arquitectura más primitiva, los fósiles que datan millones de años, las primeras esculturas clásicas, todos ellos se ven beneficiados de estas nuevas herramientas.

Esta tendencia de aprovechar e incluso adaptar las herramientas, materiales y tecnologías creadas para su uso en otros ámbitos, para utilizarlas con fines de conservación¹ y artísticas, ha sido común a lo largo de la historia. Así, es ahora el turno de las diversas y novedosas técnicas 3D que en sus orígenes surgieron para resolver problemas de ingeniería y de industria y que se emplean hoy en numerosas tareas de patrimonio: El empleo de escáneres 3D y fotogrametría, así como de impresoras 3D y diversas herramientas virtuales, procesadores y programas de modelización es cada vez más común en el campo de la documentación, conservación y restauración de obras de arte.

Los datos obtenidos con el uso de estas tecnologías son empleados como apoyo a las técnicas más tradicionales puesto que pueden ser utilizados con diferentes propósitos cruciales en la tarea de salvaguardar el patrimonio cultural, tales como el estudio y la difusión de la obra de arte o la conservación y restauración de la misma. Sin embargo, generalmente suponen herramientas con un amplio espectro de utilización en el ámbito patrimonial que abren un abanico de nuevas posibilidades hasta hace poco inimaginables dado que, por ejemplo, la investigación de un especialista puede realizarse a kilómetros de la obra, una vez la obra ha sido digitalizada y mientras esta continúa incluso bajo tierra, a la espera de que las nuevas investigaciones del futuro permitan desenterrarla sin riesgos para su integridad.

¹ Según el Icom (2008), las definiciones de los términos son las siguientes:

Conservación: Todas aquellas medidas o acciones que tengan como objetivo la salvaguarda del patrimonio cultural tangible, asegurando su accesibilidad a generaciones presentes y futuras. La conservación comprende la conservación preventiva, la conservación curativa y la restauración. Todas estas medidas y acciones deberán respetar el significado y las propiedades físicas del bien cultural en cuestión.

- Conservación preventiva: Todas aquellas medidas y acciones que tengan como objetivo evitar o minimizar futuros deterioros o pérdidas. Se realizan sobre el contexto o el área circundante al bien, o más frecuentemente un grupo de bienes, sin tener en cuenta su edad o condición. Estas medidas y acciones son indirectas – no interfieren con los materiales y las estructuras de los bienes. No modifican su apariencia.

- Conservación curativa: Todas aquellas acciones aplicadas de manera directa sobre un bien o un grupo de bienes culturales que tengan como objetivo detener los procesos dañinos presentes o reforzar su estructura. Estas acciones sólo se realizan cuando los bienes se encuentran en un estado de fragilidad notable o se están deteriorando a un ritmo elevado, por lo que podrían perderse en un tiempo relativamente breve. Estas acciones a veces modifican el aspecto de los bienes.

- Restauración: Todas aquellas acciones aplicadas de manera directa a un bien individual y estable, que tengan como objetivo facilitar su apreciación, comprensión y uso. Estas acciones sólo se realizan cuando el bien ha perdido una parte de su significado o función a través de una alteración o un deterioro pasados. Se basan en el respeto del material original. En la mayoría de los casos, estas acciones modifican el aspecto del bien.

A pesar de que muchas de estas posibilidades son aún desconocidas, las opciones a la hora de realizar intervenciones sobre las obras de arte se han visto multiplicadas y notablemente mejoradas gracias a las nuevas tecnologías.

Sin embargo, como todas las actuaciones implicadas a la hora de estudiar obras de arte, el tratamiento con tecnologías digitales aplicadas a la conservación exige una gran responsabilidad. Es necesario partir de las formulaciones teóricas correctas, ya que el procedimiento es empírico y la obtención de resultados satisfactorios y adecuados depende también de los conocimientos de los investigadores. Surge por tanto la necesidad de investigar sobre las tecnologías digitales en profundidad, afirmando que toda actuación que conlleve una mejora del estudio y análisis del patrimonio debe ser cotejada y estudiada con el fin de valorar si es justificable su uso y posible futura integración en los protocolos de actuación.

La falta de una formación específica que permita asumir estos compromisos con adecuadas garantías puede conllevar serios riesgos a la hora de educar en las Facultades y Escuelas de Restauración, lo que puede conllevar una mala *praxis* por parte de los futuros conservadores-restauradores. Estas deficiencias en la formación se intentan paliar mediante formaciones complementarias de cursos, sobre todo en línea, cuya proliferación, dada la demanda por parte de los profesionales, ha sido espectacular en los últimos, podría decirse, cinco años, sobre todo en los cursos referentes a las técnicas de digitalización del patrimonio.

Sin embargo, muchos de estos cursos no suelen aportar la adecuada formación práctica ni se insiste suficientemente en las cuestiones metodológicas ni en las técnicas y procedimientos adecuados, puesto que actualmente no existen protocolos de actuación claros, a pesar de que en la actualidad han surgido ciertos intentos de regular la calidad y deontología de las digitalizaciones, tal y como se verá en el documento Los Principios de Sevilla, por ejemplo.

De hecho, para analizar y valorar el empleo de las nuevas tecnologías en el ámbito del patrimonio con motivo de escribir la presente tesis doctoral, se ha tenido que recurrir, dada la escasa bibliografía existente sobre este tema, sobre todo a algunos artículos que los propios profesionales se encargan de publicar en las revistas vinculadas con el tema de la conservación del patrimonio, donde exponen sus casos y sus experiencias con estas nuevas herramientas. Por ello, debe constituir uno de los objetivos a alcanzar lo antes posible que

los criterios y metodologías de actuación sean desarrollados de manera adecuada y que se enseñen en las facultades y escuelas de restauración, puesto que, sin esta formación, los alumnos se insertan en el mundo laboral sin conocimiento de todas las posibilidades reales que actualmente tienen a su alcance, y en caso de conocerlas, podría hacerse un mal uso de ellas.

A pesar de esta realidad, algo ha comenzado, eso sí lentamente, a cambiar, puesto que en determinados museos existen ya, con la misma importancia que cuando se trata del departamento de pintura contemporánea, departamentos de tecnología 3D en los que diferentes profesionales trabajan día a día con estas herramientas. Tal y como se usa a diario en sus talleres el ordenador o la cámara de fotos, se emplean en estos casos archivos 3D e impresoras 3D. De momento pocos son los museos, pero es muy predecible que la tendencia se contagie y cada vez sean más las instituciones museísticas que acojan las nuevas tecnologías como parte de sus planes de documentación, conservación y restauración.

De este modo, en la presente tesis doctoral se analizan las tecnologías 3D y sus aplicaciones a las tareas de documentación, divulgación y conservación y restauración del patrimonio, con el fin de poder extraer las conclusiones pertinentes y referentes a su utilidad en este campo, riesgos y seguridad, viabilidad, agilidad y costes. Estas utilidades aparecen además reflejadas en diversos estudios de caso aportados en los que ha participado la doctoranda. Así, se muestran diversos ejemplos que incluyen la conservación y difusión de bienes paleontológicos del CSIC, así como la conservación del patrimonio complutense, entre el que se encuentra la escultura pública Los Portadores de la Antorcha y la Farmacia Hispanoárabe del Museo de la Farmacia Hispana. Estos estudios han permitido desarrollar diferentes metodologías de trabajo que constituyan pautas de actuación para obras de características similares constituyen los objetivos de la presente tesis doctoral.

Podrá así conocerse hasta qué punto o en qué tareas el empleo de las tecnologías 3D es realmente preciso, necesario y útil a la hora de tratar con determinadas obras de patrimonio tangible, y sobre la necesidad de su implantación en algunos departamentos de los museos. Igualmente, la presente tesis doctoral pone de manifiesto la necesidad de que la enseñanza de estas tecnologías y otros aspectos relacionados con las mismas se impartan de manera adecuada en los centros de formación de los profesionales del patrimonio.

PARTE I- TECNOLOGIAS 3D: REGISTRO, MODELADO E IMPRESIÓN

Capítulo 1. Registro de la superficie

En el ámbito del patrimonio, la información que contiene la superficie de un bien es, lejos de lo que puede pensarse, potencialmente útil. Tal y como será visto a lo largo de la presente tesis, la superficie de un objeto artístico aporta numerosa información que los profesionales analizan y estudian, por lo que la obtención del registro de dichas superficies, se presenta vital en las tareas de salvaguarda del patrimonio.

Dada la importancia de esta premisa, a lo largo del capítulo serán revisados cada uno de los sistemas que posibilitan el registro de una superficie. Para ello el capítulo comienza tratando los antecedentes de estos sistemas, situando al lector en la materia desde tiempos antiguos hasta la actualidad, donde, tal y como se verá, las metodologías que emplean tecnologías 3D han supuesto un gran avance para el registro de la superficie de un objeto.

1. 1 Antecedentes

Desde la Antigüedad y dentro de su actividad diaria, el hombre ha buscado la manera de reproducir objetos con fines diversos, mediante materiales y metodologías variadas. Para ello, debía recabar los datos de la superficie y morfología del objeto, es decir, proceder a su registro. Tradicionalmente, este proceso se ha llevado a cabo mediante dos sistemas básicos: el de sacado de puntos y la realización de moldes.

Probablemente, el primer molde surgió cuando los seres humanos comprendieron que presionando sobre el barro el pie o la mano, aparecía la fiel reproducción de la extremidad (Navarro Lizandra, 2002, p.151).

En lo que respecta a la reproducción de objetos artísticos y arqueológicos tridimensionales, el método más habitual de registro ha consistido en la realización de vaciados, técnica que implica el moldeo del original y, a partir de ese molde o negativo, se obtienen los vaciados o positivos (Marcos, 2003, p.32).

En la realización de moldes, han sido empleados diversos materiales como metales o ceras, aunque destaca entre todos ellos el yeso, por su generalizado empleo en el ámbito escultórico. La elección del material y la metodología depende de la utilidad que quiera otorgarse a la reproducción.

Los hallazgos de los restos más antiguos de vaciados en yeso datan del año 2.400 a.C. y constituyen máscaras egipcias mortuorias y vaciadas del natural (Gañán, 1999, p.100). Para la realización de estas se aplicaba yeso sobre el rostro del reciente fallecido obteniéndose así la fiel copia de su cara en negativo, de modo que estas posteriormente debían positivarse empleando materiales fluidos de punto de fusión bajo, como la cera de abeja o este mismo material combinado con resinas (Savinio, 2012).

El método por cuadrícula es el más antiguo conocido para realizar reproducciones, ampliando o disminuyendo la imagen a reproducir. Consiste éste en realizar dibujos del modelo dentro de una cuadrícula que, al repetirse después, se emplea como sistema de medición. Estos dibujos servían de referencia para trasladar al bloque la silueta de la figura. Se sabe que el sistema fue utilizado ya en el antiguo Egipto puesto que restos hallados de esculturas inacabadas dejan constancia de la utilización de técnicas basadas en el empleo de dibujos cuadriculados. También los griegos utilizaron y perfeccionaron este método (Gañán, 1999, p.90).

Por otra parte, a lo largo de la historia ha sido muy común que las reproducciones se efectuasen mediante el sistema de sacado de puntos (Marcos, 2003, p.32). Esta metodología, que implica la ayuda de distintos instrumentos, permite trasladar una serie de distancias entre puntos desde el original hasta el bloque donde va a realizarse la reproducción, posibilitando una gran agilidad para copiar una escultura de un material en otro, ampliarla o reducirla.

En la antigua Grecia, en el siglo V a. C, se empleaban plomadas para la recopilación de datos de la obra a reproducir: se fijaban dos ejes de trabajo, uno vertical y el otro horizontal, y, mediante una plomada, se tomaban los puntos más salientes verticales, mientras que la otra se iba aproximando a los diferentes puntos internos en sentido horizontal. Midiendo las distancias que había entre las cuerdas de las plomadas se iban determinando los diferentes puntos; posteriormente esas distancias eran pasadas al bloque donde se llevaría a cabo la reproducción mediante la realización de orificios (Gañán, 1999, pp.89 y 90).

El período romano es conocido por la gran cantidad de copias realizadas, con el fin de abastecer el mercado de las esculturas griegas de los más afamados artistas (Luzón, 2003, p.17), como Praxíteles y, en general, toda la producción escultórica del s. IV a. C (Rudel, 1986, p.18).

Como se ha indicado, las obras maestras griegas se copiaban mediante el ya citado procedimiento de sacado de puntos (Rudel, 1986, p.21). Poco a poco fue modificándose el tradicional sistema de la plomada al añadir bastidores graduados y cuadriculados, con lo que se obtuvo, como resultado, un complejo y laborioso sistema, que dejó constancia de su eficacia en los restos de la estatuaria griega y romana (Gañán, 1999, p.90). Así el perfeccionamiento conseguido en la época helenística y en Roma implicaba el empleo de dos bastidores paralelos y graduados, uno vertical y otro horizontal, tanto en el modelo como en el bloque. Después, mediante cuerdas, plomada, compases y calas, eran establecidos los puntos de referencia en el modelo y trasladados a la reproducción (González Fernández, 2013).

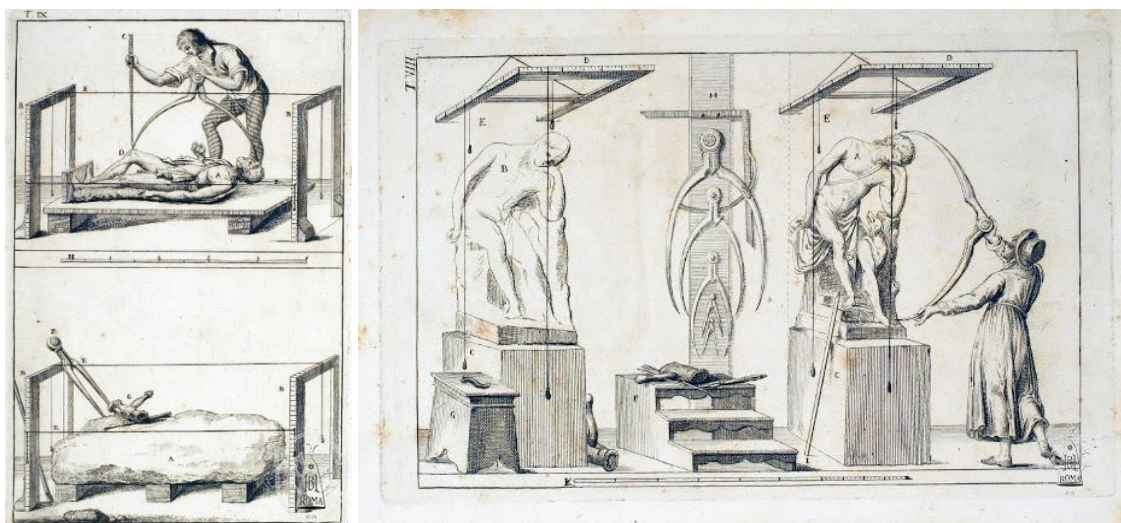


Fig. 1 Sistema de sacado de puntos empleando compases, bastidores y cuerdas.

Además de este tipo de registro del original, que consistía en situar puntos sobre él y trasladarlos al bloque de la copia, otro modo de registrar la superficie era la realización de un molde. Las técnicas del vaciado con escayola, cuyo proceso se desarrolla en líneas posteriores, se perfeccionaron también a lo largo de este periodo; sin embargo, tras la caída del Imperio romano, cayeron en desuso (Gañán., 1999, p.100).

Durante la Edad Media, las técnicas del yeso se empleaban en la realización de moldes y en el tallado directo de este material, cuando aún no había terminado de fraguar. Destacan como ejemplo las espectaculares yeserías árabes, realizadas mediante ambas técnicas (molde y positivo y talla del yeso). Pero también existen referencias sobre la utilización del yeso en la realización de vaciados, Cennino Cennini en el *Il Libro dell'Arte*, del s. XIV, da instrucciones sobre la elaboración de un vaciado con este material. Sin embargo, será en el Renacimiento cuando se produzca el absoluto resurgir de las técnicas relacionadas con el yeso, ya que numerosas de las copias de esculturas antiguas fueron vaciadas en este material (Gañán, 1999, p.100).

Con el descubrimiento de las esculturas y relieves de la Antigüedad clásica durante la Edad Media y el Renacimiento se inicia una intensiva demanda de copias de modelos clásicos para colección y estudio, generalizándose las acciones de copiar, sacar vaciados, reinterpretar, reducir o ampliar a escala (Sauras, 2003, p.90), especialmente en talleres italianos de Florencia y Roma (Luzón, 2003, p.19). A su vez, se continúa empleando el sistema de sacado de puntos, incluyéndose algunas variaciones (Gañán, 1999, pp.91 y 92) tales como la descrita por Alberti en su tratado *De Statua*: un ingenioso sistema marca todos los puntos fijos salientes del yeso y los traslada sobre el mármol, del que se eliminará la materia superflua para obtener las “justas medidas” (Rudel, 1986, p.30). Para ello se emplea la *exempeda* y el *definitor*. La *exempeda* es una regla graduada con dos escuadras móviles de carpintero, empleada para la determinación exacta de los diámetros de las formas, mientras que el *definitor* localiza cualquiera de los puntos de la escultura a



Fig. 2 Método Alberti.

reproducir. El instrumento cuenta con un aro graduado que se coloca en sentido horizontal sobre el modelo, y de cuyo centro parte un brazo giratorio, también graduado, del que pende la plomada móvil en sentido vertical. Para localizar los puntos interiores del modelo se utilizan calas graduadas, siempre perpendiculares a la plomada (Gañán, 1999, pp.91 y 92).

Durante el Barroco se populariza un nuevo sistema denominado de los tres compases. Éste es muy utilizado para ampliar y reducir, aunque también para realizar trabajos de copia de relativa exactitud (Sauras, 2003, p.111). El procedimiento puede ser llevado a cabo de dos maneras, utilizando un ángulo, basándose en el Teorema de la Semejanza de triángulos, o por medidas basadas en el Teorema de Thales. Es necesario fijar siempre tres puntos en el modelo, de modo que se forme un triángulo rectángulo, repitiendo la operación en el bloque de donde se extraerá la copia. Para localizar los puntos, se hace centro en los puntos referenciados, abriendo cada compás hasta llegar al punto que se desea trasladar. Con la apertura de los compases fijada (se ha de numerar el compás de modo análogo a los puntos para que a cada punto de referencia le corresponda un compás específico), se traslada al

bloque en el que se va a realizar la copia, eliminando la materia que sobra hasta que los compases converjan, determinando así el punto buscado. Para aumentar o disminuir se ha de calcular un coeficiente de ampliación o reducción (Gañán, 1999, pp.92 y 93).

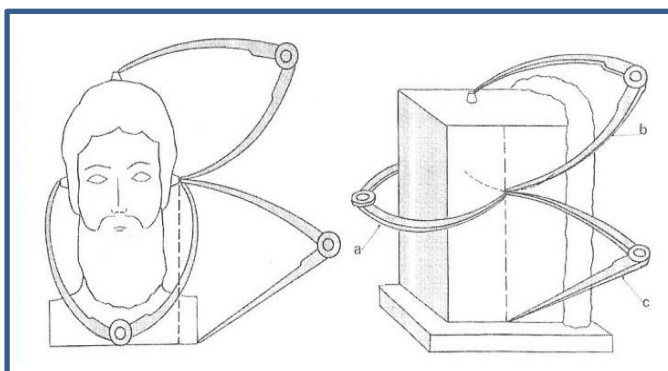


Fig. 3 Sistema de los 3 compases.

Por otra parte, la realización de moldes y vaciados de escayola continúa constituyendo una técnica primordial para realizar copias de esculturas y son muy valoradas durante los siglos XVI y XVII (Gañán, 1999, p.60). A modo de ejemplo, pueden recordarse aquellos vaciados que Velázquez, enviado por el Rey Felipe IV para decorar con cuadros y esculturas el Alcázar de Madrid, trajo a Madrid de su segundo viaje a Italia. Estos vaciados se conservan hoy en la Academia de San Fernando siendo, además de excepcionales obras, una fiel documentación de la estatuaria antigua de Roma. Si bien es

cierto que los originales pueden contemplarse en diversos museos, estos se han visto modificados y alterados por el tiempo y las diferentes restauraciones a las que se les ha sometido. Por ello, estos vaciados tienen un valor añadido ya que, a través de ellos, permiten pensar como fueron los originales tal y como Velázquez y sus coetáneos pudieron apreciarlos en la época (Marichalar y Tejada, 2007, p.13).

Los descubrimientos de las Ruinas de Herculano en 1719 y Pompeya en 1748 y la publicación de las obras de Winckelmann¹, entre otros, provocaron la sistematización de unos nuevos principios para el arte. La creciente admiración que surge por lo clásico, desemboca en la realización de numerosas copias. Este influjo de lo antiguo será mayor en la escultura y el dibujo, debido a la facilidad presentada por los restos clásicos a ser transportados y reproducidos por sistemas de copia, con lo que se difundieron por toda Europa. Por ello, las técnicas referentes a la copia de esculturas comienzan un amplio desarrollo, tanto en los sistemas mecánicos de traslado de puntos como en la elaboración de moldes (Gañán, 1999, pp.60 y 61). Durante este período la realización de moldes puede llegar a ser verdaderamente compleja y algunos presentan más de mil piezas (Gañán, 1999, p.101). En los siglos XVII y XVIII las Academias de Bellas Artes establecen enseñanzas en las que se incluyen como fundamentales los estudios artísticos del cuerpo humano mediante el dibujo de esculturas, de copias de vaciados en yeso de la antigua escultura clásica; es lo que se conoce como "dibujo de estatua". Para ello, se fueron engrosando importantes colecciones de esas copias en las Academias (Marcos, 2003, p.33). Además, se llega al máximo apogeo del comercio de yesos y copias en mármol de numerosas esculturas y se genera un verdadero mercado (Luzón, 2003, p.23).

Durante el s. XVIII se emplean múltiples métodos para el traslado de puntos, como el sistema de jaulas y escuadras, la plomada, etc. Uno de los más conocidos, es el de Leonardo Da Vinci, sistema de bastidores y jaulas con plomada, que en su momento no fue muy difundido, pero que después sería perfeccionado en la Academia Francesa de Roma en el s. XVIII (Gañán, 1999, p.90). Este sistema es una variante de los métodos de la plomada y de Alberti, que consiste en incluir modelo y bloque en un prisma con aristas

¹ Arqueólogo clásico e historiador de arte alemán, 1717-1768. En 1755 publicó su primera obra, un ensayo titulado *Reflexiones sobre la imitación de las obras griegas en la pintura y la escultura*. Sus relatos sobre las excavaciones en Pompeya y Herculano aportaron la primera información científica fiable sobre los tesoros enterrados en los yacimientos. En 1762 publicó *Observaciones sobre la arquitectura de los antiguos* y en 1764 una de su obra más importantes, *Historia del arte de la Antigüedad*, donde examina la historia del arte griego y teoriza sobre sus principios estéticos fundamentales. Otra obra distinguida de Winckelmann fue *Monumentos Antiguos Inéditos* (Epdlp, s.f.).

graduadas; por medio de reglas y calas perpendiculares a las aristas, se determinan los puntos (González Fernández, 2011).

En el s. XIX, las reproducciones de yeso entran en museos y universidades. Se impone entonces el método de la cruceta o puntómetro, inventado por Nicolás Mari Gateaux. Este es un brazo metálico articulado mediante una cola móvil que en el extremo tiene una cala graduable. Se han de establecer puntos de apoyo en el modelo, exteriores o interiores, que apoyen en la cruceta que contiene al puntómetro. Este se orienta hacia el punto a determinar y se establece un tope con profundidad en la cala, para posteriormente trasladarlo al bloque y desbastar hasta que la cala toque el bloque, determinando el punto deseado (Gañán, 1999, p.94).

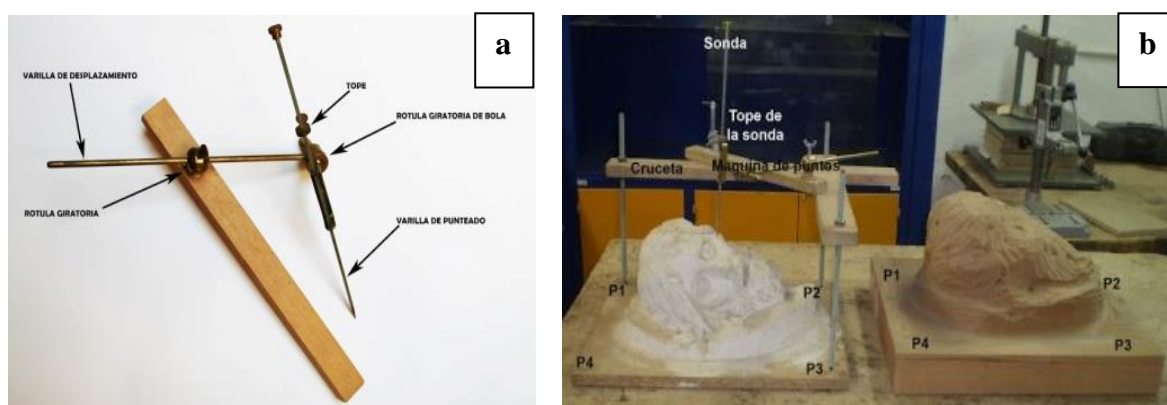


Fig. 4 Recreación de Puntómetro: a) máquina de Puntos; b) puntos P1-P2-P3-P4 situados tanto en el modelo (a la izquierda), como en la reproducción de madera (a la derecha). ©Ángel González Fernández.

Es en este momento cuando aparece, probablemente, lo que sería la primera apuesta museística alrededor de una copia: la realizada en partes de la tumba de Seti I por Giovanni Battista Belzoni, que en 1821 se muestra en la Sala Egipcia de Londres. El trabajo no tenía nada que ver con el ámbito de la conservación, de hecho, causó graves daños en el original debido a que se tomaron moldes de cera sobre los muros, haciendo desaparecer numerosas policromías, ya que fueron arrancadas porciones de la decoración, generando, todo ello, daños irreparables en la tumba. No obstante, fue un gran éxito comercial para Belzoni y el propietario de la Sala Egipcia, William Bullock. Como consecuencia, se activó la primera gran ola de interés cultural hacia Egipto, que se extendió por media Inglaterra y se abrieron oficinas en Luxor que organizaban las primeras visitas turísticas a los templos, tumbas y otros lugares. En el auge del coleccionismo que caracterizó a la Inglaterra victoriana,

muchos de los visitantes viajaron con sus propios kits de yeso, papel o moldeo de cera para hacer sus moldes en las tumbas que visitaban (Factum Arte, s.f. a).

Sin embargo, el invento que permitió la reproducción industrial de copias de esculturas es el pantógrafo, hallazgo definitivo antes de la implantación de los nuevos sistemas, que permitiría la reproducción de esculturas en serie.

A finales del s. XVI, Dillinger ya inventó el primer pantógrafo, fabricado con cuatro reglas articuladas que permitían copiar, ampliar o reducir un dibujo plano simplemente siguiendo sus líneas. En 1743 L'Anglois intenta adaptarlo a la escultura sin conseguirlo, hasta que en 1837 Aquiles Collás descubre el modo, llegándose a la definitiva mecanización del proceso en el s. XX. Existen numerosos tipos de pantógrafo, aunque básicamente todos suelen componerse de dos brazos paralelos, uno acaba en una punta roma, el copión, y el otro en un eje giratorio, donde se fijarán las barrenas, palas o brocas. Estos brazos se encuentran situados sobre un marco metálico al que se fijan por un lado el bloque y por otro el modelo y operan con un movimiento simultáneo. El copión va pasando por la superficie del modelo y el brazo paralelo, que tiene una barrena giratoria, va devastando el bloque. Las barrenas se han de ir cambiando disminuyendo de tamaño según se acerquen al bloque y afinen el volumen (Gañán, 1999, pp.94 y 95).

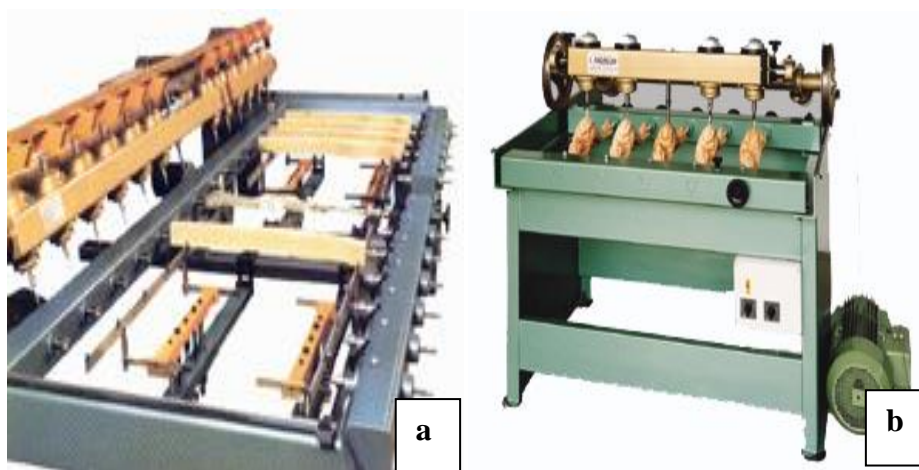


Fig. 5 Equipos copiadores de formas 3D: a) modelo para realizar 10 reproducciones; b) modelo para realizar 4 reproducciones. ©Axial SRL.

1. 2 Metodología tradicional de registro empleada en la actualidad

Las cualidades superficiales de una obra de arte revelan a los expertos una gran cantidad de información y de datos fundamentales en el estudio del patrimonio, por lo que los sistemas empleados para reproducir obras de arte han de ser lo más fieles posibles a la realidad, reproduciendo los mínimos detalles si fuera posible, pero de modo que contemplen siempre el empleo de sistemas y materiales que impliquen el máximo respeto hacia la integridad del original.

1. 2. 1 Sistemas y materiales de moldeo

Actualmente, tal y como se verá en capítulos posteriores, el sistema de realización de vaciados continúa empleándose en tareas patrimoniales y artísticas. La experimentación con nuevos materiales ha conseguido que la industria haya desarrollado productos que facilitan el registro de casi cualquier forma, por lo que pueden copiarse una gran multitud de objetos (Navarro Lizandra, 2002, pp.151 y 152). En este punto debe mencionarse la tesis de Rita Gil Macarrón, que lleva por título *Protocolos de Conservación y Restauración aplicables a la Colección de Aves y Mamíferos Naturalizados del Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid*. La autora muestra como el sistema de copias y reproducciones se emplea para la restauración de apéndices en las colecciones de taxidermia, a modo de “prótesis”. De este modo, puede verse como se realizan moldes de silicona de los dedos y uñas de un oso polar, del hocico de un pécarí, de cuernos de rinoceronte e incluso de plumas de diferentes aves, por lo que, gracias a los materiales actuales, los moldes pueden trabajarse sobre piel, pelo y pluma, obteniéndose resultados de muy alta calidad (Gil, 2015, pp.720-743).

En el ámbito escultórico se entiende por vaciado, como se ha indicado ya con anterioridad, todos aquellos trabajos relacionados con la realización de moldes y sus positivos en diversos materiales (Sauras, 2003, p.151) y tiene por objetivo la reproducción o multiplicación de diferentes objetos o partes de éstos (Gañán, 1999, p.98).

De este modo, puede definirse el molde como la pieza o grupo de piezas que constituyen el negativo volumétrico del original, y donde más tarde el material de reproducción va a aplicarse y a adquirir la forma del objeto a reproducir. Existe una gran variedad de materiales y técnicas que pueden ser empleadas para la realización del molde, pero el principio es siempre el mismo: establecer coordenadas que definan la porción de espacio que ocupa o desocupa el modelo a reproducir. El material que se emplee para la reproducción, es decir, para el positivado de la pieza, ha de ser fluido, fundido, blando o maleable, para poder adaptarse a la forma y los huecos que el molde presente. Por tanto, para vaciar una obra, se obtiene primeramente el molde que contiene el hueco de su volumen para posteriormente lograr la reproducción, denominada también vaciado (Matía, 2009, pp.117 y 118).

Por lo tanto, el molde es la forma que envuelve al modelo y contiene la forma del objeto a la inversa, de ahí que reciba el nombre de negativo. Cuando la forma hueca del molde se rellene con el material de reproducción escogido, la forma obtenida vuelve a invertirse con respecto al molde, es decir, vuelve a ser como es en el objeto original, constituyendo el positivo.

1. 2. 2 Tipos de molde

Numerosas son las clasificaciones que pueden establecerse a fin de establecer los tipos de molde. Puede aportarse, para ello, la siguiente Tabla 1, donde su autor Matía (2009, p.118) incluye los tipos de molde más frecuentes de acuerdo a la terminología habitualmente empleada:

RÍGIDOS	PERDIDOS	De un solo uso, para obtener el positivo. El negativo (molde) se destruye. El original generalmente es de barro.		
	DE PIEZAS REUTILIZABLES	Las piezas son de pequeño tamaño	A LA FRANCESA	Consta de dos madreformas que engarzan el resto de las piezas. Otra pieza contiene el orificio por donde se vierte el material para el vaciado
			A LA ITALIANA	Consta de cuatro madreformas y dos casquetes en la parte superior e inferior. Esta última presenta el orificio para la entrada de material
			MOLDES DE MATRICERÍA	Molde de cada uno de los elementos que conforman el molde de piezas
FLEXIBLES	Con frecuencia reutilizables. Generalmente constituidos por elastómeros, de origen natural o sintético. Esta circunstancia permite la extracción del molde con cierta facilidad: alginatos, elastómeros sintéticos (silicona, poliuretano, etc.) y elastómeros naturales (colas, gelatinas)			
MIXTOS	Cuando la impronta se obtiene simultáneamente con elementos rígidos y flexibles en el mismo molde			

Tabla 1 Clasificación de los moldes. ©Paris Matía Martín.

A su vez, por lo que a materiales de moldeo respecta, podría establecerse la siguiente clasificación:

- Materiales blandos:

- Materiales blandos no elásticos:

- . En fase líquida:

- Fase fría: barbotina (arcilla en fase muy líquida).

- Fase caliente: ceras.

- . Materiales viscosos: productos aplicados sobre el modelo mediante presión. En este caso el original ha de ser una pieza sencilla y pequeña: arcilla, plastilina, masillas de resina u otros materiales, ceras.

- Materiales blandos elásticos:

- Fase líquida:
- Fase fría: son los más utilizados actualmente, por su funcionalidad: látex, siliconas y poliuretano.
- Fase caliente: gelatina.
- Materiales duros: de fase líquida fría: yeso, cemento, morteros, resinas de poliuretano, epoxi, poliéster.

1. 2. 2. 1 Materiales más empleados en la elaboración de moldes: yeso, silicona

Merecen especial descripción, por su amplio empleo en la realización de moldes, materiales como el yeso (escayola) y la silicona.

- **Yeso:** la palabra yeso recoge dos acepciones diferentes. Designa tanto la piedra de yeso natural (algez, cuya composición es $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), como a la misma materia tratada industrialmente por el hombre para sus diferentes usos (yeso cocido, basanita o yeso de París, químicamente $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ y anhidrita CaSO_4). Los tratamientos ejercidos sobre la piedra natural, siendo el más común la aplicación de calor con temperaturas oscilantes entre 120 °C y 1000 °C, hacen que la piedra de yeso pierda parte o toda el agua de cristalización; y dan como resultado estos productos (Rubio, 2010, p.24).

Químicamente la estructura cristalina del sulfato de calcio está constituida por cadenas en las que se alternan iones SO_4^{2-} e iones Ca^{2+} . El agua de cristalización se dispone entre estas capas formando una red por lo que, al aplicarse calor, el compuesto se deshidrata y se forma el hemihidrato o la anhidrita, dependiendo de la temperatura que se alcance en el proceso, apareciendo canales vacíos paralelos a la cadena de sulfato de calcio, que permiten la aproximación de aniones y cationes, disminuyendo, además, el volumen. La cocción del yeso, por tanto, altera su contenido en agua de cristalización, si bien se conservan las impurezas que pudieran acompañarle. En la elaboración de moldes se emplea fundamentalmente este yeso hemihidrato, conocido como escayola, que también

puede presentarse en la naturaleza como basanita, aunque no es frecuente por su inestabilidad (Santos, 2005, pp.51 y 52).

Existen básicamente cinco clases de yesos y escayolas, según el Pliego RY-85, que se refiere a las normas UNE 102-010 y UNE 102-011: **Yeso grueso** (YG, constituido por hemihidrato y anhidrita II artificial. Su índice de pureza ha de ser superior al 75%.); **Yeso fino** (YF, constituido por hemihidrato y anhidrita II artificial. Con granulometría más fina que el YG. Su índice de pureza ha de ser mayor del 80%.); **Yeso de prefabricado** (YP, constituido por hemihidrato y anhidrita II artificial. Con mayor resistencia y pureza que los yesos YG y YF. Su pureza ha de ser superior al 85 %.); **Escayola** (E30, integrada básicamente por sulfato cálcico hemihidratado, su pureza ha de ser superior al 90%.); **Escayola especial** (E35, constituida casi enteramente por sulfato cálcico hemihidratado, su pureza ha de ser superior al 92%). Además de estas cinco clases de yeso, existen otros yesos de fraguado lento y yesos que contienen diversos aditivos que les confieren características específicas (Santos, 2015, p.43).

Como es sabido, una de las propiedades que presenta el material y ha propiciado precisamente su amplísima utilización como material de molde es su capacidad de fraguar tras haber perdido esta agua de cristalización. El sulfato de calcio hemihidrato y ciertas anhidritas se transforman de nuevo en dihidrato en contacto con agua, rehidratándose (Santos, 2015, p.45).

- **Silicona:** inicialmente se crearon para fines de carácter industrial, pero, dadas sus propiedades, han pasado a emplearse abundantemente en el ámbito de la escultura y restauración escultórica e incluso pictórica con el objeto de obtener copias de las obras o restaurarlas.

Las siliconas se han convertido en uno de los materiales más usados en la realización de reproducciones. Su uso ha revolucionado la elaboración de moldes flexibles, debido a las propiedades derivadas de su estructura química, que las convierten en un excelente material para la reproducción: alta capacidad de registro, escasa retracción, capacidad de reticular a temperatura ambiente, desmoldeo sencillo, permiten la reproducción de un elevadísimo número de copias y en infinidad de materiales (escayola, resinas, cemento, siliconas, metales de baja fusión como el plomo o el estaño), posible

regulación de su *tixotropía*² y de su velocidad de curado, etc. Además, entre sus propiedades adecuadas para la realización de moldes destacan:

- Blandura y elasticidad variables cuando ya han curado, posibilitando la extracción de concavidades recuperando su forma.

- Autodesmoldeo, que permite una separación fácil (del objeto original reproducido y de la reproducción) para la inmensa mayoría de los materiales.

- Polimerización sin generar calor, por lo que se evitan riesgos de impacto térmico sobre el objeto reproducido.

- Baja tensión superficial, que proporciona un ángulo de contacto bajo, por lo que moja y se infiltra en todas las superficies, lo que da lugar a una alta capacidad de registro (aunque dependerá de la viscosidad de cada silicona y otros factores).

- Ausencia de porosidad.

- Estabilidad dimensional, ya que las más empleadas polimerizan por una reacción de condensación, originando subproductos que disminuyen el tamaño de la silicona al fluir al exterior, merma que puede ser contrarrestada por el contramolde rígido. Si se desea mayor exactitud dimensional pueden emplearse siliconas de adición de retracción química (Pereira, 1999, pp.70 y 71).

Químicamente, las siliconas son compuestos orgánicos a base de silicio. La nomenclatura científica se deriva de la del Silano (SiH_4). Los átomos de silicio forman cadenas no por enlaces Si-Si, sino con átomos de oxígeno, es decir, Si-O-Si. Si a esta molécula inicial de silicona se le incorporan los grupos reactivos adecuados, es decir, el catalizador, se produce una reticulación, por la cual la silicona cambia de estado líquido y se vuelve flexible. Según la reticulación, pueden diferenciarse dos tipos de siliconas:

- **Siliconas monocomponentes** (VTA-1/RTV-1³): su curado se realiza mediante reacción con la humedad atmosférica.

- **Siliconas bicomponentes** (VTA-2/RTV-2): la parte A son polímeros de silicona, concretamente aceites de silicona, compuestos básicamente por polidimetilsiloxanos

² Costa (2006) define la tixotropía como la capacidad de un líquido para reducir su viscosidad aparente mientras se aplica una cierta cantidad de calor o energía mecánica, como el corte o la vibración (citado en Jerez, 2010, p.18).

³ Las siglas VTA hacen referencia a la vulcanización a temperatura ambiente del material y proceden de las de lengua inglesa RTV (RoomTemperatureVulcanizing).

(PDM) y una carga; y la parte B es un catalizador, que da lugar a la polimerización de la parte (Horie, 1987, p.156). A su vez, estas pueden ser de adición o de condensación, siendo estas últimas las más ampliamente utilizadas en el moldeo artístico (Pereira, 1999, pp.70 y 71).

Existen muy diversos tipos de silicona en las que cada fabricante tiene su propia fórmula, aunque cabe destacar que todas son combinadas con cargas para aumentar su fuerza y reducir el costo, de modo que siempre debe consultarse la ficha técnica del material para conocer su composición y características. Empresas ampliamente conocidas en el mundo de la restauración y conservación, así como de las artes plásticas, son Ferocha S.A., especializada en soluciones para el moldeo y CTS SRL, empresa de referencia en ámbito internacional para el suministro de materiales para la Restauración, Conservación y Archivo de todas las obras de interés histórico-artístico-monumental.



Fig. 6 En la imagen de la izquierda (a) aparece el producto Silical 110 de CTS SRL, silicona apta para todas las técnicas de moldeo en vertical o de grandes dimensiones donde se requieran características de laborabilidad (largo tiempo de trabajo y características mecánicas). ©CTS SRL. A la derecha (b) puede verse el producto Silastic 3481, de Ferocha S.A., silicona que se caracteriza por su alta resistencia a las resinas de Poliuretano, Poliéster y Epoxi. Sus excelentes propiedades y su gran resistencia tanto química como mecánica, permiten la obtención de un mayor número de piezas por molde. Entre sus características principales se encuentra su capacidad de desmoldeo, su excelente fluidez y su elevada elasticidad, para una fácil retirada de reproducciones complejas. ©Ferocha S.A.

A su vez, existen diversos agentes de curado que modifican la velocidad del curado de las siliconas de condensación. De esta manera, su empleo ralentiza el proceso, permitiendo un mejor registro de la pieza; o, por el contrario, agiliza el trabajo y reduce la

posibilidad de que la silicona líquida penetre en exceso en zonas de fisuras o grietas del molde quedándose enganchada (Pereira, 1999, p.73). Es fundamental conocer el tiempo de trabajo que presenta la silicona a emplear. Puede definirse este como el espacio de tiempo que discurre desde la mezcla de la silicona con el agente de curado hasta el momento en que ya no puede ser manipulada. También es importante definir el tiempo de reticulación o de curado, siendo aquel que comprende desde la mezcla de la silicona con el agente de curado hasta que el curado permite poner en uso el molde de silicona. Este tiempo va a depender directamente del propio agente de curado empleado, por ejemplo Feroqa S.A. oferta los agentes de curado 81, 81F⁴ y 81VF⁵, que reticulan en 24, 5 y 1,5 horas respectivamente (Feroqa S.A., s.f.). Otros ejemplos son los de la silicona plasmable de CTS SRL, que tiene dos, el Silical 115 y el Silical 116 rápido, que tienen un tiempo de curado de 16-18 horas y 6-8 minutos respectivamente (CTS SRL, s.f.).



Fig. 7 En la imagen aparecen 3 botes de agentes de curado de Feroqa S.A. A la izquierda del todo aparece el agente 81, en medio el 81F y a la derecha el 81 VF. ©Feroqa S.A.



Fig. 8 Aditivo tixotrópico de Feroqa S.A. ©Feroqa S.A.

Por otra parte, puede modificarse la viscosidad de la silicona mediante el empleo de unas gotas de agente tixotrópico que, en mezcla con la silicona, solventa el problema de penetración de esta en la pieza, derivados de su elevada porosidad o de la presencia de fisuras. La silicona más viscosa sirve para engrosar el molde cuando se aplica la segunda capa de silicona (Santos, 2017a, p.104).

⁴ La F hace referencia a la palabra fast, rápido en inglés.

⁵ La VF hace referencia a las palabras very fast, muy rápido en inglés.

Antes de seleccionar el procedimiento y materiales a utilizar cuando se plantea la realización de un molde sobre un objeto, han de tenerse en cuenta una serie de variables tales como si la forma de la pieza es más o menos compleja, si es un elemento frágil o

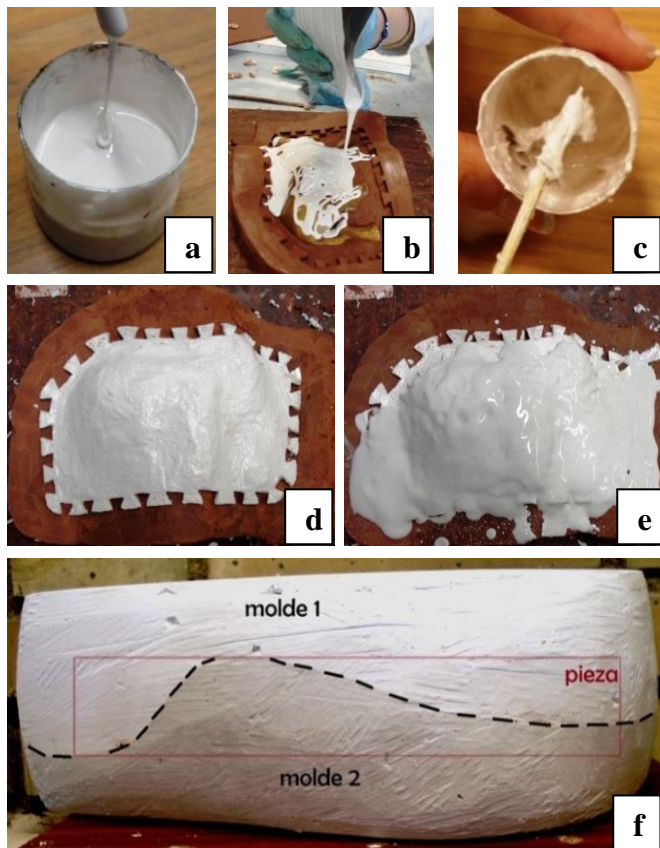


Fig. 9 Proceso de preparación de un molde flexible de silicona con madre rígida de escayola: a) preparación de la silicona; b) aplicación de la Silicona sobre el objeto a reproducir; c) silicona con agente tixotrópico; d) silicona aplicada 24 horas después; e) Aplicación de la escayola; f) molde de dos piezas finalizado. ©María Ávila Rodríguez.

resistente, si es un relieve o una pieza exenta, el material constitutivo de la obra; si éste no se altera con el material utilizado en la realización del molde; el número de vaciados que se desean realizar; el grado de complejidad del modelo y si es necesario o no conservar el molde (Santos, 2017b).

Si se desea una alta capacidad de registro, el empleo de materiales autodesmoldeantes como la silicona constituye una de las mejores opciones, ya que el empleo de los desmoldeantes sobre el modelo, empleados a fin de que el molde no se adhiriera a la pieza a reproducir, da lugar a la merma en el registro y puede además causar daños al objeto.

La calidad de registro tiene relación directa con la viscosidad del material empleado para realizar el vaciado. A mayor viscosidad, menor capacidad de registro. Por ello, esta es una cualidad que ha de tenerse en cuenta y revisarse en la ficha técnica del material, cuando se planifica la realización del molde. También es importante tener en cuenta la tensión superficial del líquido, de la que depende su capacidad de mojado. Cuanto menor es la tensión superficial, mayor será su capacidad de mojado y registro de la pieza. Por todo ello, los materiales de fase líquida permiten el registro más fielmente, aunque pueden infiltrarse entre los detalles del original. El material empleado en fase líquida debería encontrarse a temperatura ambiente para no causar daños en el original (Pereira, 1999, pp.69 y 70).

Del proceso de moldeo pueden derivar una serie de patologías, especialmente en materiales porosos, por lo que, en este tipo de piezas más delicadas, ha de prestarse especial atención al procedimiento seguido y la protección de la pieza. No solo puede darse la inclusión de pequeños restos de material en los intersticios de la misma, sino que la aplicación de silicona sobre una pieza puede dar lugar al oscurecimiento de la misma o al incremento de su tensión superficial. A fin de evitar todos estos problemas, han de manejarse con corrección los tiempos de curado de la silicona y los aditivos tixotrópicos. En este tipo de piezas es fundamental, además de aplicar los cuidados señalados, elegir un protector adecuado. Algunas de estas sustancias empleadas para proteger el original pueden mancharla de manera irreversible. Por ejemplo, las ceras pueden causar cambios de color y brillo en las piezas porosas y es más frecuente usar en ellas los coloides protectores o, mejor aún, ciclododecano. Esta sustancia, que sublima a T ambiente, puede utilizarse de manera inocua sobre estas piezas porosas. Siendo hasta el momento empleados para esos materiales más porosos, alcohol polivinílico y coloides protectores. Para los materiales metálicos suele emplearse Paraloid B-72 y B-82, Synocril o goma laca. Para reproducir el vidrio y protegerlo, suele utilizarse vaselina (Santos, 2017b).

Aún con el empleo de protectores, siempre deben sopesarse las ventajas y desventajas que supone el hecho de llevar a cabo un proceso de moldeo sobre la pieza original y, actualmente, el empleo de protectores se desaconseja cuando se trata de obras artísticas, ya que pueden causar alteraciones en su superficie, como manchas o variaciones de tono. En cualquier caso, los tradicionales sistemas de moldeo continúan utilizándose para hacer reproducciones de otras copias (Santos, 2017a).

En una obra escultórica, estos sistemas de moldeo pueden dañar la superficie, sobre todo si la obra original se encuentra deteriorada; igualmente, puede eliminar pigmentos o pequeños fragmentos de pintura cuando se trata de una pieza policromada, si esta presenta los estratos descohesionados; y puede, además, darse el caso de que la silicona reaccione con la superficie de la pieza y se quede adherida a ella, como a veces ocurre en el caso del vidrio si no se emplea desmoldeante. Por otra parte, la escayola empleada para realizar el contramolde aporta humedad indeseable a la pieza, aunque no esté en contacto directo con la misma, lo que puede ocasionar problemas de corrosión en piezas metálicas.

Teniendo en cuenta la problemática que puede generarse, si el objeto sobre el que se efectúa el modelo es una pieza artística, el primer criterio que debe tenerse en cuenta es

causar siempre el mínimo o nulo daño al original, descartándose cualquier empleo de materiales duros, ya que su desmoldeo podría dar lugar al arranque de pequeños fragmentos. Si el material que se escoge está en estado sólido debe ser más blando siempre que la materia del modelo (Pereira, 1999, pp.69 y 70).

De este modo, dada la condición intrínseca de la técnica, que implica contacto directo del material de registro con la pieza, se han generado a lo largo de la historia numerosos daños en las mismas cuando no se han tomado las debidas precauciones, contribuyendo todo ello a generar cierta polémica sobre su empleo en obras patrimoniales.

Además, un molde tiene durabilidad limitada, la pieza precisa de un proceso manual de limpieza de la figura y estas técnicas tradicionales representan una manera de trabajar costosa y lenta. Por ello, actualmente el procedimiento se intenta mejorar mediante la incorporación de tecnologías digitales (de la Torre-Cantero, Saorín, Meier, Melián-Díaz. y Drago-Díaz, 2015, p.434). Es cierto que, con la especialización de la técnica y la aparición de nuevos materiales, los riesgos y daños producidos se ven minimizados; sin embargo, estas jamás deben emplearse en aquellas obras de arte que presenten un delicado estado de conservación. Actualmente continúan realizándose reproducciones de patrimonio material, pero, en estos casos, cada vez es menos frecuente el registro directo de la obra mediante molde, siendo generalmente más empleadas otras técnicas con las que se obtienen registros 3D. La elaboración de moldes y vaciados se reserva para otras fases de la realización de las reproducciones, y se aplican sobre esos modelos 3D obtenidos mediante impresoras o fresadoras 3D (Santos, 2017a).

Se ha hecho referencia, por tanto, a lo largo del capítulo, a la realización del registro de la pieza, haciendo alusión al moldeo tradicional. Sin embargo, para obtener el positivo a partir de un molde, se precisan otras metodologías y materiales, que serán descritos en el capítulo 3.

1. 3 Empleo de las nuevas tecnologías

Tal y como se indicará a lo largo de la tesis, las tecnologías 3D conllevan que las posibilidades de actuación e intervención en el ámbito del patrimonio hayan aumentado notablemente, estando muchas de estas aplicaciones aún por descubrirse (Escriba y Madrid, 2011, p.11).

Las técnicas de digitalización 3D son la mejor opción a la hora de registrar datos, ya que como se ha indicado, los sistemas de moldeo que emplean el contacto directo del material con la obra, podrían causar daños en el original si no se toman las debidas precauciones.

La industria desarrolló los primeros métodos utilizados para la obtención de prototipos, a fin de agilizar la labor de producción⁶. Estos métodos empleaban los principios básicos del pantógrafo y fueron adaptándose lógicamente a las nuevas tecnologías. En ellos, el elemento que actúa sobre el material siempre desbasta (Matía, 2009, pp.123 y 124) y se trata, por tanto, de una técnica sustractiva⁷.

A pesar de que los pantógrafos se monitorizan, realizando una lectura del original más óptima con menor esfuerzo y mayor rapidez, surgen nuevos sistemas que permiten agilizar el proceso de lectura de la superficie del modelo por medio de diferentes máquinas; apareciendo equipos que funcionan marcando coordenadas de las tres magnitudes espaciales (Matía, 2009, p.23). Es entonces cuando la lectura de los modelos, y registro de los datos, da lugar a una digitalización, al registro de los datos de la obra que conforman su volumen.

Definiendo la digitalización como un proceso mediante el cual se expresan datos en forma digital, puede afirmarse que la digitalización de la superficie de una obra de arte es una tarea que está investigándose desde hace relativamente poco tiempo. Donald Kuspit (2016) afirma que “La digitalización pone de manifiesto en términos matemáticos la matriz de sensaciones que informa y sustenta la representación”. (p.12)

Con la digitalización de la superficie de una obra de arte se consigue un exhaustivo estudio del relieve y el volumen que tal y como se irá viendo a lo largo de esta tesis, puede

⁶ Ejemplar original o primer molde en que se fabrica una figura u otra cosa.

⁷ Esto será en el capítulo 3 desarrollado.

ser empleada con diferentes propósitos. La validez de estos datos depende de la calidad de los mismos, siendo imprescindible la alta resolución en el ámbito patrimonial.

Los primeros sistemas de digitalización empleados en el ámbito de la conservación actualmente han caído en desuso, desbancados por las nuevas tecnologías. Tal es el caso del palpador electrónico, empleado en el registro de datos para documentar el patrimonio o realizar copias. Un ejemplo de esta tecnología es el palpador electrónico Microscribe (Autodesk Inc., 2004), con el que es necesario dibujar previamente los puntos a registrar sobre la superficie de la misma, de modo que cuando el lápiz entra en contacto con el punto seleccionado, se produce su registro mediante el aporte de las coordenadas de sus tres magnitudes espaciales y a partir de un origen de referencia. Se obtiene, de esta manera, la definición del volumen general de la pieza. Los cálculos de registro y reproducción se realizan por medios informáticos y la resolución dependerá de la cantidad de puntos registrados. Con este tipo de registro, el detalle se ve seriamente limitado, por lo que se obtiene una copia, pero nunca una fiel reproducción. Como ejemplo puede mencionarse el Digitalizador manual de Microscribe.

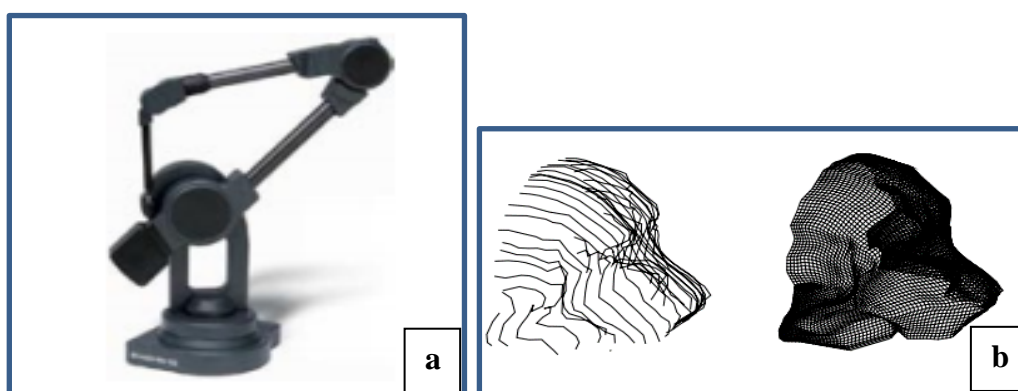


Fig. 10 La imagen de la izquierda (a) muestra el digitalizador de MicroScribe y a la derecha (b) la imagen muestra una simulación en la que puede verse las líneas que se han dibujado sobre un objeto para que el Microscribe las lea. A su derecha aparece la malla del objeto generada a partir de esas líneas trazadas. ©AutoDesSvs. Inc.

Cierto tipo de instrumentos muy empleados en diferentes disciplinas, tanto en ingeniería como en proyectos de conservación⁸ son las máquinas de medición por coordenadas (MMC) portátiles. Estos equipos de medición 3D permiten registrar la superficie del objeto con alta precisión. Faro Technologies, Inc. es una de las empresas encargadas de fabricarlos y vende equipos de documentación 3D para resolver problemas

⁸ Ver en capítulo 7 el proyecto denominado *Museum of Pure Form* que empleó el escáner 3D ModelMaker en combinación con un brazo FARO®, tecnología de medición 3D (Loscos et al., 2004).

metrológicos dimensionales (Faro Technologies, Inc., s.f.). La empresa es mencionada en diferentes proyectos en los que esta tecnología ha sido necesaria y consta, por tanto, su amplio empleo en la conservación y documentación del patrimonio.

En este punto ser destacado el *perfilómetro*, que se encarga de explorar la superficie del objeto con el fin de obtener su perfil. Los primeros perfilómetros trabajan en contacto con la superficie del objeto de estudio y únicamente pueden realizar mediciones en 2 dimensiones, puesto que se desplazan vertical y horizontalmente sobre una línea. Existen perfilómetros fijos que no pueden moverse a otros emplazamientos y perfilómetros móviles, que presentan la desventaja de trabajar únicamente en horizontal. Sin embargo, gracias a la tecnología 3D surgen los perfilómetros ópticos, que se caracterizan por no requerir contacto directo con la superficie a medir, ya que únicamente hay que apoyar sobre la superficie el dispositivo de medida. Estos emplean haces de luz para caracterizar la superficie, lo que permite realizar medidas en superficies horizontales, verticales o en cualquier otro ángulo (Fort, Álvarez, Vázquez-Calvo y Gómez-Villalba, 2013, pp.201 y 202).

Un ejemplo de perfilómetro empleado en la actualidad son los sistemas Leica DCM 3D, que han sido diseñados para el análisis rápido y sin contacto de estructuras microscópicas y nanoestructuras en superficies técnicas. Este realiza mediciones a alta velocidad con una excelente resolución de hasta 0,1 nm (Leica, s.f.).

Los estudios de rugosidad de la superficie son muy útiles para numerosos materiales empleados en patrimonio puesto que permiten conocer en detalle los datos superficiales y en 3D de vidrios, metales, pinturas, fotografías, sellos, papel, materiales pétreos (Fort et al., 2013) ...

Los perfilómetros se utilizan en el ámbito patrimonial fundamentalmente para el estudio de barnices, conocer como estos impregnan las superficies sobre las que se aplican o también en la investigación del nivel de penetración de la suciedad en la superficie de una obra.

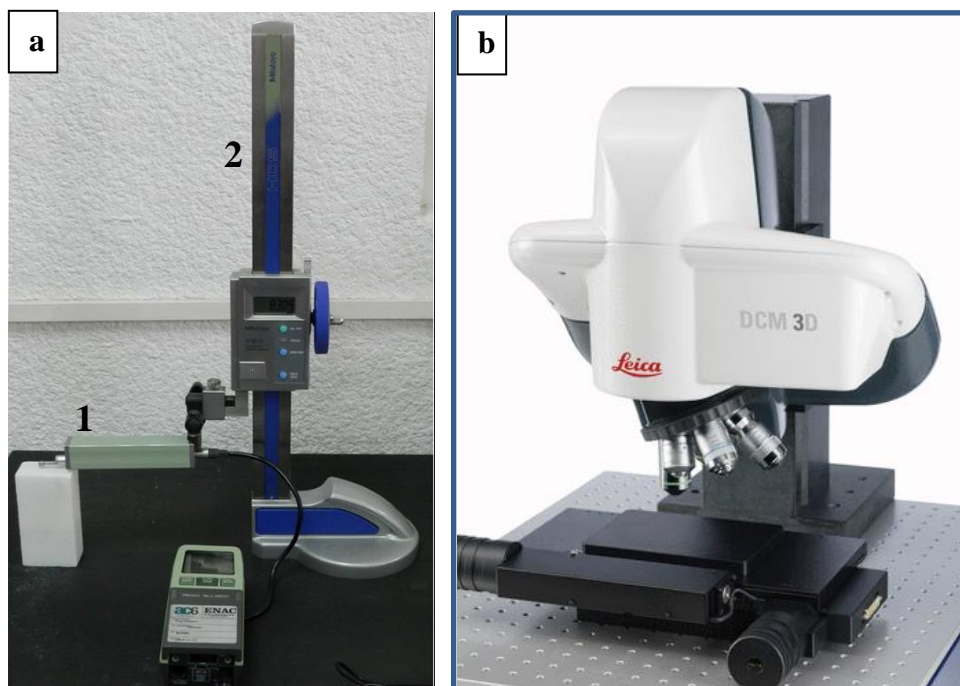


Fig. 11 A la izquierda (a) la imagen del perfilómetro: perfilómetro (1) midiendo una probeta de mármol mientras el equipo auxiliar (2) se utiliza de sujeción y nivelación. © Fort, Álvarez, Vázquez-Calvo y Gómez-Villalba. Por su parte a la derecha (b), el sistema de metrología de superficies ópticas 3D Leica DCM 3D. ©Leica Microsystems.

Sin embargo, los escáneres 3D, móviles y exentos de contacto alguno con las piezas, se convirtieron en las herramientas más empleadas, para las tareas de documentación, conservación y restauración del patrimonio. Por ello, se requiere profundizar en las características, funcionamiento y tipología de escáneres 3D.

1. 3. 1 Escáneres tridimensionales de superficie

Los escáneres 3D basan su principal funcionamiento en cámaras que capturan con uno o varios disparos la imagen en volumen del objeto a reproducir mediante una emisión de luz, ultrasonidos o láser, que barre la superficie definiendo la posición en 3D para cada toma. Posteriormente, los datos se combinan mediante softwares específicos hasta conseguir la imagen del modelo (Matía, 2009, p.123). Por medio del escaneado tridimensional de la superficie, la información que se obtiene da lugar a una digitalización, ya que realmente lo

que estos sistemas realizan es medir puntos de la superficie del objeto por medio de la distancia existente entre el equipo y el objeto a registrar.

De este modo, con la aparición de estos sistemas, capaces de medir las coordenadas de las tres magnitudes espaciales, x , y , z^9 , los escáneres 3D cobran importancia en el ámbito patrimonial, dado que no solo agilizan el proceso de lectura de la superficie de un modelo, sino que además eliminan cualquier contacto con la pieza durante el registro de su superficie. Que el proceso se lleve a cabo sin necesidad de contacto alguno con las piezas se presenta como una cualidad fundamental a la hora de manipular obras de arte especialmente frágiles.

Mediante el escaneado tridimensional de la superficie, se genera y obtiene un archivo que contiene la medida digital del objeto. Este archivo únicamente es relevante, en lo que a patrimonio se refiere, cuando cuenta con el suficiente detalle como para mostrar correctamente toda la información, es decir los datos del objeto, ya que, de lo contrario, la imagen escaneada no resultará fiel a la realidad. Sin embargo, es fundamental entender que, de acuerdo a la finalidad del trabajo a desarrollar, serán necesarias unas calidades u otras en lo que a los datos obtenidos respecta (Ávila, 2017, p.193). Este punto será desarrollado más adelante, pero esencialmente hace referencia al hecho de que cuanta mayor resolución se obtenga, mayor será el peso del archivo, y más difícil y lento de manejar y trabajar por lo que, dependiendo de la utilidad que este vaya a tener, puede no ser necesaria tanta resolución.

El escaneado trabaja mediante un sistema de medición óptico, que proyecta luz sobre el objeto y permite así realizar medidas por coordenadas por medio de trigonometría¹⁰, de modo que desaparece cualquier contacto con la pieza durante el registro de su superficie.

Los sistemas más empleados actualmente son el escaneado 3D con luz láser y el de luz estructurada, que serán posteriormente descritos en detalle. Actualmente, existen otros medios, pero no se utilizan debido a la carencia de definición que proporcionan, tales como los escáneres de Rayos X y los de ultrasonidos, con los cuales no se obtienen los mismos resultados que empleando los otros escáneres referidos.

⁹ El sistema de coordenadas tridimensional se construye trazando un eje Z, perpendicular en el origen de coordenadas a los ejes X e Y.

¹⁰ Que miden por triangulación.

Existe una gran variedad de tipos y modelos comerciales en el mercado, tanto de escáneres como de los programas informáticos. Ambos elementos van a condicionar, en cierta medida, el proceso de trabajo y la agilidad con la que pueden obtenerse resultados (Mañana-Borrazás, Rodríguez Paz y Blanco-Rotea, 2008, p.18).

Es fundamental destacar que si se realiza un registro con la mayor densidad de puntos de la que sea capaz el sistema, el tiempo de captura se multiplica, a cambio de obtener un nivel de resolución que, para numerosos casos, puede ser muy superior al necesario. Debe valorarse, por lo tanto, qué grado de resolución es necesaria en función de las necesidades del proyecto (Mañana-Borrazás et al., 2008, p.18).

1. 3. 1. 1 Proceso de escaneado

A continuación, se desarrolla el esquema de trabajo necesario y habitual para la realización de un escaneado correcto.

1. 3. 1. 1. 1 Calibrado del equipo

En cualquier ámbito científico, es preciso obtener una alta rigurosidad en los estudios realizados para que los resultados resulten fiables, por lo que contar con un instrumental carente de sistematismos tales como las imperfecciones de fabricación, desgastes o impactos, es primordial. El conocimiento de estos errores es abordado de modo que desaparezcan o bien se mitiguen al máximo posible sus efectos sobre los resultados. Sin entrar en detalles técnicos y matemáticos, puede afirmarse que el proceso mediante el cual los errores instrumentales se eliminan de aquellos observables, es conocido como calibración geométrica. Dada la velocidad a la que estos equipos trabajan obteniendo medidas, resulta fundamental que el instrumental proporcione coordenadas totalmente fiables, sin aquellos errores que pueden ser evitados. La calibración de escáneres es

también conocida como autocalibración cuando esta se realiza en el mismo lugar donde se van a registrar los datos (García San Miguel, Lerma, y Navarro Tarín, 2013, p.31), es decir, el propio equipo es calibrado por el usuario, sin necesidad de ir a centros que lo hagan. Este autocalibrado constituye una fase previa al escaneado fundamental, dado que derivado de este proceso el software va a obtener los valores que necesita internamente para realizar los cálculos a la hora de escanear (Ikaslab, 2015).

La calibración es, por tanto, la medición del hardware de escaneado en el software y sirve para que este último pueda obtener los datos 3D precisos y sin distorsiones en la escala correcta (David3D, s.f.).

Los escáneres se autocalibran siguiendo las instrucciones incluidas en los manuales de uso. Para ello, generalmente, han de emplearse paneles de calibración, facilitados por el fabricante del escáner, que pueden ser complementados con diferentes soportes de fijación, trípodes, una escuadra para su sujeción, en ángulo de 90°, etc., que actúan como objeto de referencia para la calibración (David3D s.f.). Habitualmente cuentan con un fondo blanco sobre el que existe una matriz en negro constituida por puntos, líneas o una cuadrícula de cuadrados. Lo más común es que los softwares vayan indicando los pasos a seguir y se vayan seleccionando las operaciones a realizar conforme se va avanzando en la calibración.

Para comenzar, se han de situar dichos paneles sobre un soporte horizontal y poner en funcionamiento el escáner que comienza a emitir una serie de proyecciones. De manera automática realizará sus propios cálculos.

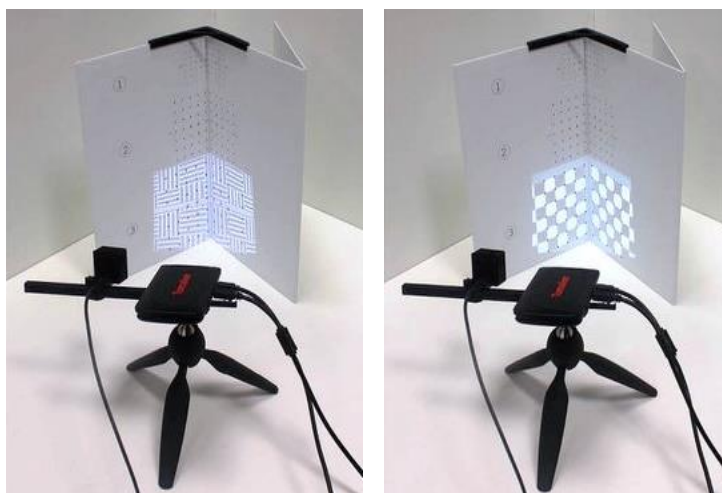


Fig. 12 Proyecciones de un escáner Digibuu de Tumaker sobre los paneles para la calibración del mismo.©Ikaslab.

Determinados escáneres precisan que se escoja una escala y la proyección se introduce en uno de los recuadros del panel. La elección de la escala viene determinada por el tamaño del objeto a escanear. Al seleccionar el patrón de calibración, el tamaño de este debe ser siempre ligeramente superior al del

objeto. Otros escáneres incluyen paneles de diferentes tamaños para diferentes volúmenes (David3D, s.f.). La escala es un valor que se encuentra junto a las matrices de puntos del panel de calibración. Al seleccionar la opción de calibrado en el software, esta comenzará el proceso automáticamente (Ikaslab, 2015).

Cuando el proceso ha transcurrido correctamente, lo más común es que el software así lo haga saber al usuario y la proyección sufra un cambio que indique que el proceso ha finalizado correctamente. Cuando las condiciones del entorno no son las adecuadas, el sistema da error y la razón del fallo será especificada. En ese momento se pueden considerar diferentes opciones como, por ejemplo, la configuración de exposición y brillo, con el fin de que las líneas proyectadas durante el proceso se vean mejor y se produzca consecuentemente el correcto calibrado del escáner. Con el escáner listo para registrar, el objeto puede moverse de posición; sin embargo, en ningún caso puede moverse la cámara respecto del proyector (Ikaslab, 2015).

Existen también escáneres que precisan contar con el panel de calibrado establecido de fondo mientras la pieza se escanea, aunque éstos son empleados en menor medida en los escaneados realizados para fines patrimoniales.

1. 3. 1. 1. 2 Registro

El proceso de trabajo con el escáner láser comienza con la captura de los datos objeto de estudio. El escáner puede ser situado sobre un trípode o elementos elevadores, como andamios o pértigas, que le permiten permanecer fijo. Lo más común es que el escáner se maneje por medio de un ordenador, en el cual debe haberse instalado previamente el software requerido. Esta primera fase conlleva una planificación previa del trabajo en la que se debe tener en cuenta la finalidad del escaneado. En ese momento se debe establecer la resolución o densidad de los puntos con los que se desea realizar el registro (Mañana-Borrazás et al., 2008, pp.17 y18). Es de suma importancia que la planificación previa al trabajo de campo sea exhaustiva y se detalle de manera explícita la disposición tanto de las

tomas, allí donde se situará el escáner, como de las referencias que se vayan a usar (Ruiz J. et al., 2012, p.78).

Para el registro, es preciso realizar diferentes tomas o capturas con el escáner, que variarán dependiendo de diferentes factores, aunque los principales son:

- El tamaño de la pieza a digitalizar, ya que, lógicamente, si se digitaliza un edificio serán necesarias muchas más tomas que si se digitaliza el diente de un homínido.
- La capacidad de registro del sistema, puesto que si la capacidad es baja es muy probable que tengan que realizarse más tomas hasta conseguir toda la información.
- Los accidentes que el objeto de estudio presente: este es un factor importante porque al ser sistemas ópticos, puede que existan zonas o recovecos que el escáner no capte, por lo que en estos casos se debe ir moviendo y cambiando el ángulo de incidencia con el fin de conseguir digitalizar todas las zonas.

Cuando el objeto de estudio constituye un objeto de reducidas dimensiones, es muy útil y aconsejable establecer un fondo uniforme y que se diferencie bien de la pieza. Esto va a favorecer el procesado y obtención de la nube de puntos, dado que permite posteriormente separar con facilidad el fondo del objeto de estudio (Arcusa et al., 2016, p.534). Por ello, es muy útil el empleo de plataformas giratorias sobre las que situar la pieza, estableciendo pantallas de fondo con ese color homogéneo. La plataforma se va girando así sin necesidad de mover el escáner (Tejado, 2005, p.142). Otra opción muy generalizada en la documentación de objetos de pequeñas dimensiones constituye el empleo de estudios de fotografía portátiles, en los cuales se coloca la pieza que desea ser documentada. Estos sistemas permiten que la luz que llega a los objetos sea difusa, por lo que se evitan los grandes contrastes entre luces y sombras y además permite colocar el fondo (Arcusa et al., 2016, p.534).

Sin embargo, si este presenta grandes dimensiones, tales como edificios o amplias zonas, suele ser necesario combinar distintas posiciones del escáner ya que, recordando su condición de sistema óptico, la presencia de obstáculos impide que se registren las partes que quedan ocultas al escáner. Cuando esto ocurre y aparecen zonas sin documentar, en el modelo aparecerán zonas sin información en la nube de puntos, que conllevará que el modelo no se genere correctamente. Por ello, para ir completando esas zonas es necesario

ir cambiando de posición el escáner, buscando una situación en la que sea visible la zona anteriormente oculta (Mañana-Borrazás et al., 2008, p.19).

Los distintos escaneos precisarán ser combinados posteriormente en un registro único, para lo cual pueden emplearse dianas de control, un elemento cuya posición fija es registrada en cada escaneo y que sirve como referencia al escáner para combinar después las tomas (Mañana-Borrazás et al., 2008, p.19). Además, en caso de ser necesario, pueden emplearse escalas métricas; estas sirven de referencia para las medidas del modelo resultante (Arcusa et al., 2016,

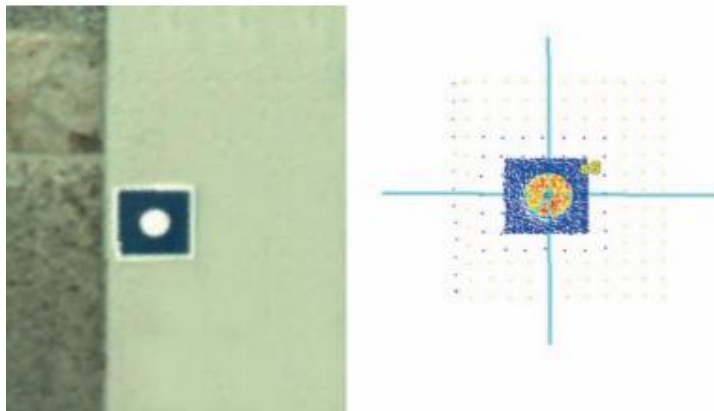


Fig. 13 Detalle de una diana de control y como se registra con el escáner. © Patricia Mañana-Borrazás, Anxo Rodríguez y Rebeca Blanco-Rotea.

p. 535). Sin embargo, existen escáneres que realizan el alineado de las imágenes de forma automática al seleccionar la opción, tal y como se verá en líneas posteriores.

El entorno en el que va a realizarse el proceso es fundamental, dado que, si no existe una luz tenue y uniforme, los resultados no serán los deseados, llegando incluso a imposibilitarse el registro. El escáner y el objeto a escanear deben encontrarse sobre superficies libres de cualquier vibración (Ikaslab, 2015).

1. 3. 1. 1. 3 Procesado

Cuando un objeto es escaneado, se obtienen una serie de elementos virtuales que van a definir el modelo. Para ello, es preciso trabajar en el ordenador con el software que el equipo de escaneado empleado suele proporcionar.

Normalmente, la primera fase del procesado es la importación de los datos al software específico. A partir de los datos medidos por el escáner se genera una nube de puntos, que puede definirse como el conjunto de puntos en un sistema de coordenadas

tridimensional (García-Gómez, Fernández de Gorostiza y Mesanza, 2011, p.29). La nube de puntos se compone por cientos de miles de mediciones individuales en el sistema de coordenadas x, y, z, que en sí mismas componen el modelo tridimensional de los objetos registrados. Sin embargo, este conjunto de puntos si no es debidamente procesado, constituye un modelo muy simplificado que opera sólo visualmente, dado que está compuesto únicamente por entidades singulares tipo punto. Por ello, la base de datos obtenida compuesta por millones de puntos, ha de ser procesada con el fin de obtener resultados que permitan representar de forma más comprensible el elemento registrado (Mañana-Borrazás et al., 2008, p.18). La fiabilidad de los datos resultantes no solo depende de la calidad de las nubes de puntos, sino que también interviene su procesado de modo que antes de avanzar a las siguientes fases todas las nubes capturadas deben ser depuradas (García-Gómez et al., 2011, p.31), realizando un filtrado de puntos que se traduce en la eliminación de aquella información no deseada, como los puntos negros y aquellos dispersos generados por errores en la toma de datos. De este modo, se consigue tanto eliminar información errónea como la obtención de un modelo más manejable (Ruiz J. et al., 2012, p.79). Con estas operaciones, aquellos elementos captados que no se desea aparezcan en el modelo o en la escena, bien porque no aporten información al estudio, o incluso porque lleguen a distorsionar los resultados requeridos, son eliminados de forma semiautomática (García Molina y de Paula, 2012, p.281).

Es fundamental la unión de las diferentes nubes de puntos antes de construir la geometría del objeto. Así una vez las diferentes nubes de puntos han sido revisadas y se tiene la seguridad absoluta de que no existen más fallos, es el momento de unir los diferentes escaneos convirtiendo la nube de puntos en la malla o, lo que es lo mismo, el conjunto de puntos no unidos en el espacio se convierte en una superficie poligonal continua (Jover y Tejerina, 2011, p.17).

La malla puede ser definida como el conjunto de polígonos que dan forma a la geometría del objeto. Dependiendo de la calidad seleccionada en posibles opciones, se puede obtener una malla de alta calidad, lo que conlleva el inconveniente de ser excesivamente pesada para trabajarla en el ordenador (contiene un gran número de datos), o bien de menor calidad, consecuentemente con un peso menor. Por ello, dependiendo de la finalidad para la que el modelo está siendo creado, este puede decimarse. El decimado

de un modelo significa simplificar el número de polígonos que lo componen, rebajando el tamaño del archivo (Arcusa et al., 2016, p.536).

De este modo, el software realiza un registro fino aplicando transformaciones rígidas en las mallas, intentando minimizar la distancia entre sus puntos. Se ha de tener en cuenta que el conjunto de puntos puede mostrar bastantes diferencias incluso en aquellas zonas que se solapan; además, una misma zona captada desde dos puntos de vista diferentes puede generar mallas muy dispares. El proceso finaliza mediante la integración de todas las mallas en una sola, que elimina las partes redundantes y proporciona un modelo 3D compacto (Esquivel, Benavides y González C., 2012, p.2176).

A lo largo del procedimiento, suelen surgir errores que han de subsanarse antes de continuar avanzando, puesto que de lo contrario se acumulan en el modelo final. Los errores más comúnmente generados se traducen en: faltas en la malla del modelo y huecos en la superficie, intersecciones incorrectas que corresponden a objetos no reales, zonas duplicadas o artefactos computacionales tales como la aparición de triángulos falsos obtenidos mediante la adquisición de tres puntos que el escáner ha captado de manera consecutiva pero que físicamente en la realidad están bastante alejados provocando la aparición de distorsiones y errores en la triangulación (Esquivel et al., 2012, pp. 2174 y 2175).

Las faltas son conocidas como agujeros y pueden evitarse mediante la realización de más tomas o el empleo de otros escáneres; o bien pueden rellenarse posteriormente mediante programas de modelado (serán descritos en el siguiente capítulo), que se encargan de tapar esos orificios empleando diferentes operaciones. La mayoría de los softwares presentaban limitaciones a la hora de obtener la imagen completa, ya que los programas solían resultar especialmente complejos a la hora de unificar la malla para conseguir la imagen final. Sin embargo, la rápida evolución que estas tecnologías están experimentando, ha derivado en que la mayoría de sistemas y escáneres cuenten con softwares específicos que solventan estos fallos gracias al desarrollo de sistemas que pueden reconocer las lagunas y generar una superficie coherente sobre ellas. Otra opción es realizar un postprocesado del modelo empleando diferentes programas de modelado 3D donde pueden solventarse estos problemas (ver capítulo 2).

Realizar modelos 3D es especialmente útil en los casos en que se requieren imágenes o resultados específicos de los objetos. De este modo, para manipular las

imágenes de un modo coherente es fundamental el correcto procesado de los datos digitalizados puesto que, generalmente, para las aplicaciones de patrimonio cultural que serán desarrolladas en los siguientes capítulos, se requiere un modelo poligonal capaz de satisfacer las necesidades de las investigaciones (García Molina y de Paula, 2012, p.281).

Es esencial que cada archivo obtenido en el proceso de digitalización y cualquier posible modificación que se le realice, al menos en aquellos modelos que van a ser empleados en el ámbito del patrimonio, sean correcta y debidamente memorizados como archivos editables y consultables en un futuro. Esto es fundamental, considerándose que próximamente estas tecnologías pasarán de ser innovadoras a obsoletas y, probablemente, todos los datos obtenidos puedan experimentar mejoras. De este modo, las digitalizaciones deben ser transparentes y no alterar bajo ningún concepto el original.

Para que la información escaneada sea realmente útil a la hora de realizar una fiel reproducción, es necesaria una alta resolución, es decir, la densidad de puntos obtenidos debe ser suficiente para ser capaz de definir en detalle la superficie, por lo que la validez que puedan tener los escaneados depende directamente de la calidad de los datos obtenidos, de la resolución y precisión a la hora de capturar la superficie.

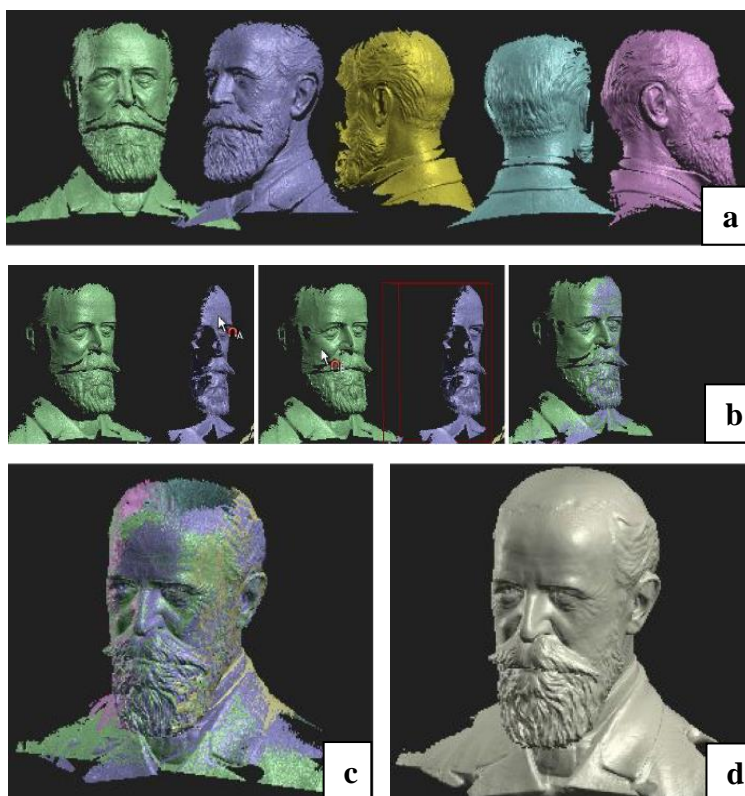


Fig. 14 Procesado de un escaneado con el escáner 3D David sls-2: a) escaneos individuales con organización arbitraria antes de la alineación; b) alineación automática con dos clics de ratón; c) escaneos después de la alineación y d) resultado de la fusión con la opción «cerrar huecos» del sistema. ©David3D.

Entre punto y punto escaneado se establece una distancia medible en micras; así, cuanto menor sea la distancia existente entre un punto y otro, más cantidad de puntos existe, lo que se traduce en un aumento de la información y detalle obtenidos. A su vez, trabajar a mayor resolución implica que la distancia entre los puntos se reduce, y la calidad de la imagen obtenida aumenta, pero como se ha indicado, escanear a la máxima resolución no es siempre la mejor opción, ya que los ficheros y los datos obtenidos aumentan considerablemente de tamaño y resultan poco manejables en el ordenador. Para elegir la resolución óptima se ha de pensar en la finalidad del trabajo, es decir, en el tamaño que ha de tener el detalle más pequeño que se desea representar, ya que no siempre es necesaria la máxima resolución (García-Gómez et al., 2011, p.29).

Los escáneres láser 3D empleados en la arquitectura y el patrimonio han tenido que esperar a que se produjeran notables avances informáticos y en la capacidad de cálculo de los ordenadores para ser ampliamente utilizados. Uno de estos avances tecnológicos fundamentales ha sido la recientemente lograda capacidad de procesamiento a 64-bits de los PCs a la que se transcriben los datos que se obtienen (Martín, Llamas y Perán, 2013, p.80).

Para que un escáner resulte adecuado y útil a la hora de trabajar en la digitalización del patrimonio cultural, si bien es cierto que suelen emplearse diferentes escáneres dependiendo el proyecto y el modelo a escanear, este ha de contar, entre otras, con las siguientes capacidades (Loscos et al., 2004):

- Escalable. Ha de ser capaz de escanear objetos pequeños y grandes.
- Portátil. Su portabilidad va a permitir que sea transportado hasta el objeto que está siendo digitalizado.
- Capaz de escanear en variables condiciones de iluminación ambiental.
- Capaz de escanear una variedad de superficies coloreadas sin que sea necesario cubrir la superficie a registrar con ningún tipo de proyección ni material.

Tal y como se indicará en capítulos posteriores, con los modelos tridimensionales surge la posibilidad de extraer numerosa y valiosa información gráfica como la generación de ortofotos¹¹ y planimetrías, modificación de los mismos con el añadido de partes

¹¹ Una ortofoto es una fotografía de vista aérea que puede ser utilizada para realizar mediciones reales, ya que es una representación precisa en la que se han corregido las distorsiones inherentes a las imágenes aéreas.

perdidas, en lo que se conoce como restauración virtual, exportación en pdf 3D, en visores web, etc.. Así, este tipo de modelos pueden ser incorporados, además, a precisas reconstrucciones y entornos virtuales, convirtiéndose en una gran herramienta de divulgación y socialización del patrimonio.

1. 3. 1. 2 Clasificación de los escáneres empleados en patrimonio

Los escáneres pueden clasificarse según el sistema de medición de distancias empleado, siendo esta la clasificación más generalizada. También existen escáneres basados en la medida del tiempo y otros en la medida de la triangulación. Los escáneres de triangulación, son de corto alcance pero presentan una alta precisión, del orden de micras, por lo que se emplean para escanear objetos de reducidas dimensiones que exigen un muestreo con un alto grado de detalle y precisión, mientras que los escáneres de medida de tiempo calculan la distancia midiendo el tiempo que transcurre entre la emisión del pulso láser y la recepción, después de que éste sea reflejado por el objeto, empleándose muy habitualmente en arquitectura para realizar el levantamiento¹² y planimetría de los edificios (García-Gómez et al., 2011, p.29).

A continuación, se desarrollan cada uno de estos escáneres atendiendo a la clasificación expuesta.

¹² Con el término levantamiento se entiende el conjunto de investigaciones y operaciones orientadas a determinar las características significativas –bajo los aspectos morfológico, dimensional, figurativo y tecnológico- de un organismo edificado o de un conjunto urbano, a evaluarlo y a investigarlo, con el propósito de construir un modelo tridimensional simplificado, a través del cual se pueda analizar la obra, facilitando así la interpretación de sus fases de transformación y de los diversos aspectos referidos a los temas más representativos. El levantamiento es, por tanto, un proceso que debe llevar al conocimiento profundo de la obra en estudio, con el fin de poner en evidencia todos sus valores, tanto geométricos como dimensionales, figurativos como estructurales, desde los materiales empleados y las técnicas constructivas, hasta las condiciones de degradación y las relaciones con el contexto urbano (Carta del Rilievo, 2000).

1. 3. 1. 2. 1 Escaneado 3D de corto alcance

Dentro del escaneado de corto alcance, puede distinguirse, como a continuación se expone, entre los escáneres de luz láser y los de luz estructurada

1. 3. 1. 2. 1. 1 Escáner de luz láser

El escáner de luz láser realiza el barrido de una superficie captando miles de puntos por segundo con un haz de láser.

Estos escáneres son un instrumento habitual en proyectos de ingeniería y han sido empleados en campos diversos. En las últimas décadas se ha trasladado con gran éxito su uso al campo del patrimonio cultural (Mañana-Borrazás et al., 2008, p.16).

En síntesis, se puede afirmar que los sistemas que emplean la luz láser para escanear están constituidos por dos componentes básicos: el láser, es decir, el dispositivo de medida de distancias; y un mecanismo de barrido, que es un sistema motorizado de espejos encargado de que el láser procedente del distanciómetro sufra una desviación en las direcciones vertical y horizontal. De este modo, el escáner es capaz de obtener la medida de la distancia de un gran número de puntos, así como datos referidos a los ángulos y al valor de la reflectancia¹³ de las superficies sobre las cuales el láser ha impactado. Con los valores angulares y la distancia registrados, se calculan las coordenadas tridimensionales x, y, z de cada uno de esos puntos (García-Gómez et al., 2011, p.29).

De este modo, como funcionamiento general de escáner de láser, puede decirse que la luz del escáner láser incide sobre el objeto y se dispersa. Parte de esta luz reflejada vuelve hacia el escáner y es recogida por un dispositivo que elabora la imagen. Por ello, la digitalización con láser en superficies transparentes presenta numerosas limitaciones, ya

¹³ La reflectancia se expresa en porcentaje y mide la cantidad de luz reflejada por una superficie. La reflectancia se mide conforme a la Publicación del CIE N°. 15.2 (1986). Los valores de la medición se evalúan con el grado CIE 10 del Observador Estándar (1964) y el Iluminador estándar D65 del CIE. (Ecophon, s.f.).

que, en estos casos, el rayo láser atraviesa el objeto, no rebota, con lo cual no devuelve al equipo láser la información sobre el objeto. Por tanto, cuanto mayor sea la intensidad de la señal de retorno, mayor precisión en la medición de la distancia, aumentando así la calidad de los datos obtenidos y, en definitiva, la imagen resultante será de mayor calidad; estableciéndose el concepto de la reflectividad¹⁴ como equivalente de calidad en la medición (García-Gómez et al., 2011, p.30).

Estos escáneres también pueden clasificarse en dos grandes grupos de acuerdo a si van montados sobre una plataforma móvil, conocidas como unidades dinámicas¹⁵, o por el contrario, permanecen como unidades estáticas, que constituyen los escáneres habitualmente empleados en patrimonio (García-Gómez et al., 2011, pp.28 y 29).

Desde que los métodos de escaneado 3D fueran implantados, se ha estado haciendo hincapié en la captura de la forma o volumen del objeto; sin embargo, el registro preciso de datos concernientes a la textura del objeto con alta calidad constituye una tarea muy reciente. Actualmente, mediante el empleo de los escáneres de luz láser, existe la posibilidad de registrar datos precisos de las texturas de las superficies, por lo que se emplean en la digitalización de lienzos, pinturas sobre tabla, y bajorrelieves, lo que hace pocos años presentaba numerosas limitaciones (Factum arte, s.f. b).

La mayoría de los sistemas de escaneado láser presentan dificultad a la hora de escanear cuadros barnizados, negros o materiales como el oro, ya que la reflectividad de la superficie genera excesivo ruido modal en los datos recogidos. El ruido modal es un efecto artificial producido por la proyección del rayo de luz sobre ciertas superficies. A pesar de ello, actualmente existen escáneres capaces de registrar minuciosamente información obtenida sobre cualquier superficie, sin importar sus acabados, brillo o grado de contraste (Factum arte s.f. c).

Tradicionalmente el patrimonio considerado como tridimensional venía siendo la escultura y la arquitectura, sin embargo, es fundamental hacer hincapié en la tridimensionalidad que también presentan los bienes históricamente considerados únicamente dos dimensiones. Por supuesto, con esta afirmación se hace referencia a la

¹⁴ La reflectividad es la fracción de radiación incidente reflejada por una superficie (Incropera y de Witt, 1996, p.665).

¹⁵ Como ejemplo se establecen las unidades LIDAR, que se explicarán a continuación.

pintura, ya sea sobre lienzo o tabla, puesto que tal y como se irá indicando a lo largo de esta tesis, la obtención de un modelo 3D de una pintura permite mostrar y estudiar elementos que actualmente no son visibles a simple vista, que ya han desaparecido o bien que están tapados tanto a causa de modificaciones, por ejemplo repintes, como a causa de alteraciones, por ejemplo cuando se desprende una policromía (Rodríguez Silgo, 2015, p.6).

De este modo, uno de los ejemplos más avanzados de escáneres empleados exclusivamente para la obtención de los datos de la superficie de pinturas (en lienzos, tablas...) y bajorrelieves es escáner Lucida¹⁶ (Factum Arte, s.f. c). Se trata de un escáner tridimensional láser desarrollado por Factum Arte¹⁷ y financiado en su totalidad por la Fundación Factum. El empleo, por parte de la empresa, de escáneres láser comenzó con los trabajos en la tumba de Seti I, a comienzos de la primera década del 2000 (ver capítulo 6).

Dada la anterior clasificación, es una unidad dinámica y de triangulación, que obtiene los datos por medio de un láser, discreto e inocuo¹⁸ que se proyecta sobre el objeto.

A medida que este se desliza sobre la superficie del objeto, el haz del láser va distorsionándose a causa del relieve que este presenta en su superficie (Factum Arte, 2013).

¹⁶ Creado y desarrollado por el artista Manuel Franquelo, cofundador de Factum Arte. Fabricado y probado en Factum Arte bajo la supervisión de Manuel Franquelo.

¹⁷ La empresa Factum Arte es pionera en utilizar las tecnologías 3D junto a otros métodos tradicionales en la digitalización y reproducción de bienes culturales. Sus ingenieros han desarrollado láseres específicos para diversos tipos de trabajo.

¹⁸ Investigaciones recientes han demostrado que el escáner con láser de baja potencia es uno de los métodos de registro más seguros utilizando sólo la luz en el extremo rojo del espectro. Se podría argumentar que incluso es menos nocivo que la fotografía convencional utilizando iluminación. De manera experimental, la autora del trabajo pudo realizar diferentes pruebas durante las prácticas de empresa del Máster de Conservación Preventiva del patrimonio de la UCM, realizadas durante el curso académico 2013-14 en Factum Arte. Las pruebas incluyeron la toma y medida de la temperatura del láser, y se demostró que este no excede de los 30°C, temperatura alcanzada en caso extremo en el que el escáner lleve horas operando. Dicha temperatura no puede aumentar dado que el propio equipo sufriría, de modo que este consta de un ventilador que enfría el haz de luz, por lo que añadiendo la distancia que el láser recorre, así como lo fino que es, se puede concluir que, al entrar en contacto con la obra, no se genera deterioro alguno en ella.

Dicha distorsión se registra gracias a dos cámaras de video USB colocadas a 45°, situadas a ambos lados del láser; e impiden que se registren alturas superiores a los 25mm, para lo cual habría de emplearse otro tipo de escáner, como los que son descritos en el siguiente apartado. Los parámetros “x” e “y” son controlados por medio del programa Lúcida Scanner, mientras que la “z” es manejada manualmente mediante una manivela. El escáner barre la superficie, abarcando secciones de un máximo de 48 x 46,8 cm², denominados baldosas, conformadas, a su vez, cada una de ellas por 20 bandas. La primera banda comienza siempre a escanearse de derecha a izquierda, y cuando llega al final, baja para registrar la segunda de las bandas, esta vez de izquierda a derecha, repitiendo el proceso 20 veces, hasta haber finalizado la baldosa. En el programa son memorizadas las coordenadas que se quieren escanear, de modo que Lúcida conoce dónde tiene que empezar y no hay posibilidad de error. Para que no exista pérdida de información, cada banda y cada baldosa se superpone aproximadamente un 10% encima de su homónima anteriormente registrada. De este modo, las distorsiones generadas en el láser, debido a la profundidad del objeto, son convertidas en información tridimensional mediante el empleo del software de Lúcida, que las muestra como un mapa en escala de grises (Factum Arte, 2012).

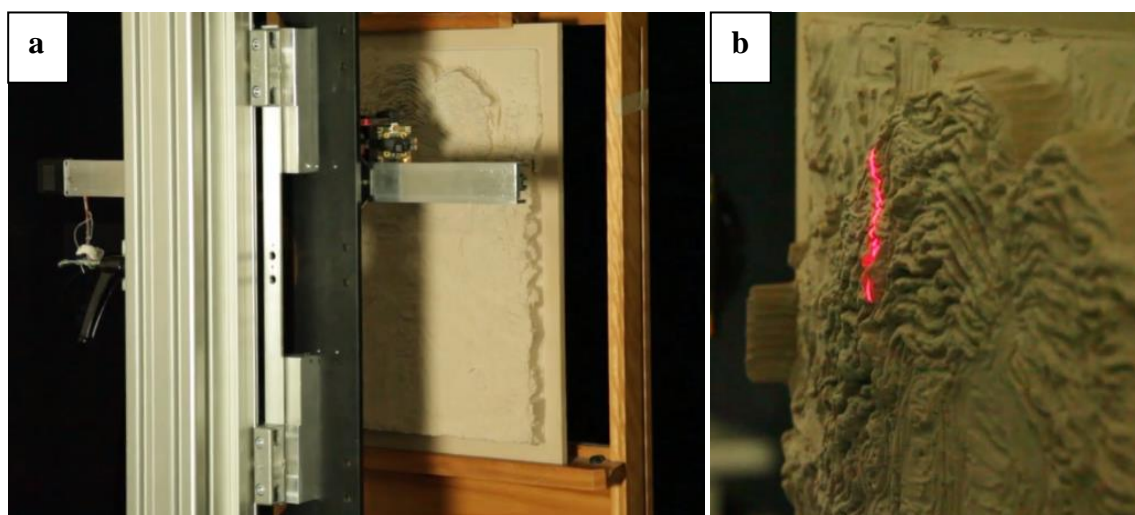


Fig. 15 Proceso de escaneado de la reproducción del relieve de un cuadro de Henri Hadson: a) Lúcida escaneando; b) detalle de las distorsiones generadas por el láser barriendo la superficie. ©Factum Arte.

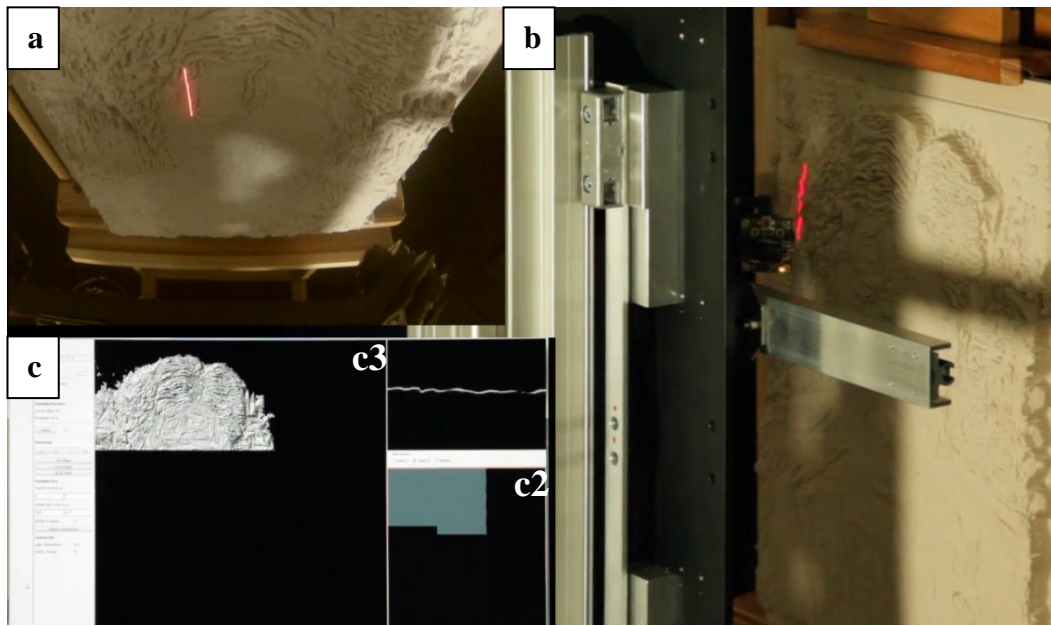


Fig. 16 En un video Factum Arte muestra el proceso de escaneado de Lúcida y el software por ellos diseñado. Las imágenes a y b hacen referencia al escáner Lúcida, visto desde dos puntos de vista diferentes, registrando la superficie de la obra *Head* de Henry Hudson. Mientras en la parte inferior de la imagen, aparece la pantalla del ordenador (c) que muestra como el software de Lúcida escaneaba la obra: la línea blanca (c1) muestra la distorsión que la luz láser del escáner presentaba en tiempo real mientras que la banda de la baldosa registrada iba avanzando también a tiempo real (c2). Cuando una de las líneas llega al final de sus límites, la información es procesada y una línea más aparece en la ventana de la izquierda (c3). En esta ventana de la pantalla se aprecian los datos que se han obtenido hasta ese momento. ©Factum Arte.

El escáner 3D Lúcida demostró su alta capacidad de digitalizar de forma precisa información 3D en alta resolución tras las demostraciones prácticas realizadas en instituciones como la National Gallery en Londres o el Museo del Prado en Madrid (ver capítulo 6).

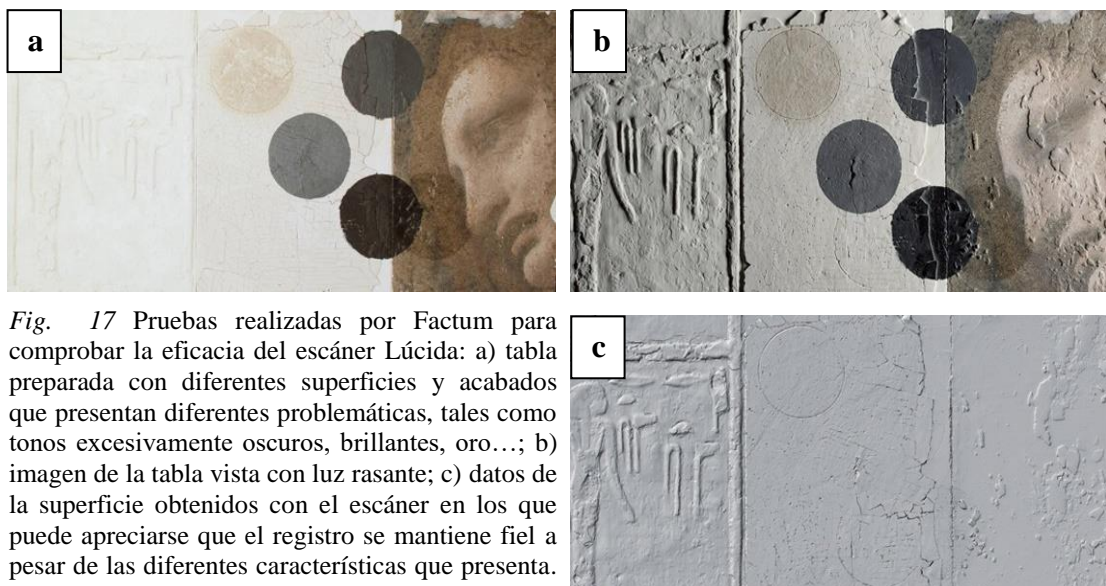


Fig. 17 Pruebas realizadas por Factum para comprobar la eficacia del escáner Lúcida: a) tabla preparada con diferentes superficies y acabados que presentan diferentes problemáticas, tales como tonos excesivamente oscuros, brillantes, oro...; b) imagen de la tabla vista con luz rasante; c) datos de la superficie obtenidos con el escáner en los que puede apreciarse que el registro se mantiene fiel a pesar de las diferentes características que presenta. ©Factum Arte.

1. 3. 1. 2. 1. 2 El escaneado 3D de luz estructurada

Realmente, el funcionamiento de los escáneres de luz estructurada es muy similar al de luz láser, pero los primeros trabajan combinando tecnología óptica, topometría 3D y un procesador de imagen digital para extraer las coordenadas en 3D de la superficie de un objeto. Esta técnica se conoce con el término triangulación de luz blanca estructurada; la luz es el único elemento utilizado en todo el proceso de medición. Sobre la superficie de la pieza a medir se proyectan una serie de franjas luminosas verticales. La información tridimensional se obtiene analizando la deformación que las líneas proyectadas sufren al reflejarse sobre la superficie del objeto. Una cámara integrada en el cabezal de medida captura una serie de imágenes en las que se observa la pieza y la deformación que sufren las líneas de luz. Este proceso de proyección y adquisición de las imágenes se realiza en pocos segundos. El funcionamiento es sencillo: se posiciona libremente el sensor delante de la pieza, y se mueve para registrar todas las zonas de la superficie que sean necesarias (Factum Arte, s.f. d). Estos sistemas se componen de un emisor de luz y un receptor de la información y el cálculo de la profundidad se realiza mediante la resolución de las intersecciones plano-recta (Geodetic Systems, Inc., s.f.).

Algunos ejemplos de escáneres de luz estructurada con los que la empresa Factum Arte ha trabajado son Nub 3D Sidio Scanning System, Breukmannsmart 3D SCAN3D y el David Scanning System.

Con Nub 3D Sidio Scanning System se puede trabajar con 3 resoluciones diferentes: 75 micras, 135 micras, 250 micras. Este, es un sistema de cámara conectado a un proyector que a su vez lo está a otros dos proyectores externos, los marcadores, encargados de señalar y registrar el área ya escaneada. Gracias al sistema es posible diferenciar las partes que se han capturado con éxito de los que el escáner no ha sido capaz de identificar. Los marcadores también son utilizados por el software para pre-alinear las diferentes tomas con las que se genera la nube de puntos global. Con diferentes colores se identifican cada una de las tomas necesarias para obtener el objeto satisfactoriamente escaneado.

Breukmann Smart 3D: trabaja con una resolución de 250 micras. Generalmente, es empleado para el proceso final de escaneado. Debido a su peso ligero y versátil, es muy

adecuado para el trabajo en andamios, donde es esencial un trabajo rápido que reduzca significativamente los problemas con las vibraciones que pueden ocurrir cuando se graba en alta resolución. Un par de sensores ópticos colocados con dos ángulos de incidencia diferentes graban el patrón de luz emitido sobre la superficie del objeto que a su vez está siendo registrada por medio de un proyector. Con el software de Breukmann Smart 3D® los pre-alineamientos se han de hacer manualmente y tal y, como ocurre siempre, cada exploración ha de tener una superposición con la siguiente. De esa manera, el operador localiza tres puntos en común entre las dos exploraciones y los alinea manualmente. La visualización de la nube de puntos como una imagen 3D ayuda al operador a ver las áreas que necesitan re-escaneo.

El escáner David Scanning System es utilizado para registrar las partes que los otros escáneres no pueden ver. Es un sistema menos preciso que los anteriores, ya que sacrifica el detalle debido a que tiene una memoria limitada, lo que le imposibilita para registrar grandes áreas en alta resolución. Pero debido a su reducido tamaño y configuración, es usado para la obtención de información acerca de la forma del objeto, ayudando a proporcionar datos para completar las partes que faltan o recuperar la forma general del objeto escaneado.

En la Facultad de BBAA de la UCM, se cuenta con el escáner 3D Konica Minolta VI-910. Este fue en su momento, probablemente, el escáner 3D más vendido de la historia, quizás por resultar relativamente económico comparado con otros escáneres del momento (Impresoras 3D.net, s.f.). Este escáner ha sido empleado en un estudio de caso de la presente tesis doctoral (ver capítulo 9).



Fig. 18 Escáner Konica Minolta VI-910 de la UCM. ©Sonia Santos Gómez.

Otro ejemplo que ilustra este tipo de escáneres es el David SLS2, que utiliza una innovadora tecnología de luz estructurada que le permite escanear de modo muy preciso en cuestión de segundos, dado que solo precisa de 2 a 4 segundos por barrido, con cada



Fig. 19 Escáner David SLS2 escaneando una escultura. ©Montaña Galán Caballero.

uno de los cuales obtiene una densidad de malla de hasta 1,2 millones de puntos. El escáner es móvil y se puede colocar fácilmente en frente de la superficie a escanear. Además, su manejo durante el proceso de escaneado es bastante sencillo (Multistation, s.f.). Este escáner ha sido empleado en un estudio de caso de la presente tesis doctoral (ver capítulo 9).

Sin embargo, han surgido unos nuevos sensores que pueden considerarse como la nueva generación de escáneres de luz estructurada. Occipital 3D Structure Sensor es un dispositivo cada vez más popular entre los arqueólogos por su sencillo manejo y, sobre todo, comodidad, puesto que se implanta en el iPad y se convierte en escáner 3D. Presentan, como todos los escáneres de luz estructurada, limitaciones a la hora de digitalizar con luz solar, puesto que las radiaciones infrarrojas de estas interfieren con su haz de luz por lo que su uso es más recomendable en interiores que en exteriores (Stanco et al., 2017, p.011025-5).



Fig. 20 Structure Sensor implantado en un iPad. ©Stanco et al.

1. 3. 1. 2. 2 Escáneres 3D de largo-medio alcance (LIDAR)

Los escáneres 3D de largo-medio alcance, conocidos como LIDAR, del inglés laser imaging detection and ranging, constituyen técnicas de teledetección óptica que utilizan la luz del láser para obtener una muestra densa de la superficie sobre la que se proyecta produciendo mediciones altísimamente fieles de las coordenadas x, y, z. Los componentes de hardware principales de estos sistemas incluyen un vehículo de recolección (avión, helicóptero, vehículo o trípode), un sistema de escáner láser, SPG (Sistema de Posicionamiento Global), e SNI (Sistema de Navegación Inercial). Este último mide la rotación, inclinación y encabezamiento del sistema lidar.

LIDAR es un sensor óptico activo que transmite rayos láser hacia un objetivo. El reflejo del láser del objetivo lo detectan y analizan los receptores en su sensor. Estos registran el tiempo preciso desde que el pulso láser es emitido por el sistema hasta que regresa para calcular la distancia límite entre el sensor y el objetivo. Combinadas con la información posicional, SPG e SNI, estas medidas de distancia se transforman en medidas de puntos tridimensionales reales del objetivo reflector en el espacio del objeto.

Los datos se procesan posteriormente y son obtenidos mediante la combinación de las coordenadas x, y, z georreferenciadas con alta precisión del análisis del rango de tiempo láser, el ángulo de escaneo láser, la posición del SPG y la información del SNI (Arc Gis, s.f.).

Los escáneres LIDAR son los más efectivos a la hora de capturar a distancia los datos espaciales en formato de nube de puntos (Hung-Ming, Ya-Ning, Min-Bin & Wun-Bin, 2010, p.2), por lo que suelen ser empleados para registrar la forma general de objetos o superficies de gran tamaño tales como edificios o bien en proyectos de topografía, en los que un escáner normal incrementaría notablemente el tiempo de trabajo. Estos escáneres no son empleados para realizar el registro de los detalles más sutiles de una superficie por lo que, para el ámbito del patrimonio cultural, los escáneres de largo-medio alcance se utilizan conjuntamente con escáneres 3D de corto alcance para generar modelos precisos (Factum Arte s.f. b).

1. 3. 1. 3 Texturizado del modelo

El proceso de texturizado de un modelo 3D puede definirse como la fase en la que se le aplica la textura a la malla del objeto, es decir la información referente al color. El texturizado, así, se basa en la aplicación de una textura establecida en un color y comportamiento, por ejemplo, la refracción, del material al que quiere representar. Sin embargo, también puede aplicarse una imagen 2D que imita una textura existente en el mundo real (Espinel, 2016, p.160). Para aplicar una textura a un objeto es preciso contar con esta información, que puede obtenerse de diferentes maneras.

Diferentes programas de modelado 3D (ver capítulo 2) permiten fusionar las imágenes obtenidas con fotografías de alta resolución sobre el modelo 3D generado con el escáner. Tal es el caso de Rapidform (Biosca, Navarro Tarín y Lerma, 2007), Z-brush y Blender, entre otros.

Otra opción es que sea el propio escáner quien obtenga la información del color. Como ha podido comprobarse, los escáneres 3D funcionan escaneando la información referente a la superficie y volumen del modelo y algunos, cada vez con más frecuencia, pueden aportar información referente a color.

Para que los puntos registrados por el escáner puedan reflejar el color de la superficie registrada, es necesario que el escáner incorpore una cámara fotográfica de alta resolución que permita relacionar cada punto medido con el láser con el color del píxel correspondiente de la fotografía de referencia (Mañana-Borrazás et al., 2008, p.16); otros sistemas permiten el acople de la cámara fotográfica digital que el usuario vea más conveniente (Biosca et al., 2007). Ejemplo de ello es el escáner Go!SCAN que es capaz de registrar el color del modelo escaneado (Go Scan3D, s.f.).

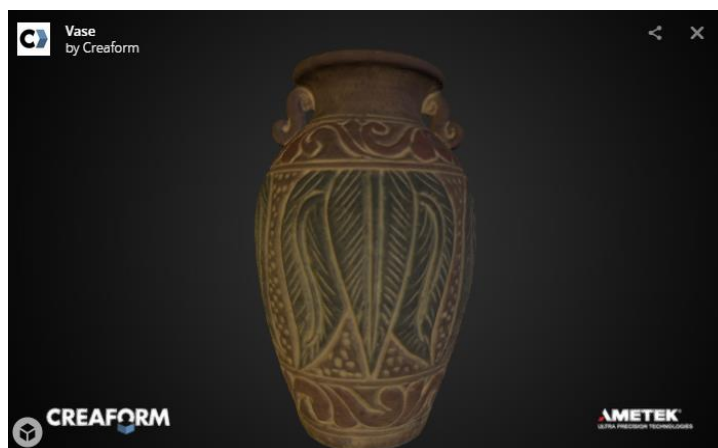


Fig. 21 Jarrón cerámico escaneado con Go!SCAN 50. ©GoScan 3D.

Otros escáneres permiten registrar el color proyectando al final de cada toma patrones de colores, una vez ha finalizado el proceso de medición de los datos volumétricos (David Vision Systems GmbH, 2015). En este caso, el sistema trabaja mediante la medición de las coordenadas RGB, del inglés Red, Green, Blue, es decir rojo, verde y azul respectivamente. En estos casos el modelo tridimensional es generado con color a partir de la nube de puntos tomando para cada triángulo el color de sus vértices (Biosca et al., 2007).

Sin embargo, los escáneres 3D aún no son capaces de registrar el color con la calidad requerida para determinados estudios de conservación, como la documentación o la realización de facsímiles, que requieren una alta definición de detalle en este aspecto. Por ello, el modelo generado con el escáner precisa complementarse con la información obtenida por medio de otras técnicas, puesto que, a pesar de los avances obtenidos en el escaneado, con los escáneres actualmente no existe la posibilidad de obtener tan alto grado de detalle en color.

Para que la textura de un modelo 3D pueda ser comparada con la imagen proporcionada por la cámara digital, sobre todo haciendo referencia a niveles de detalle de resolución elevado, el escáner debe ser un equipo muy especializado. Esto ocurre porque el contenido de color y textura que proporciona una imagen fotográfica como documento gráfico es difícilmente superable por la obtenida con un escáner y sobre todo, es sencilla de interpretar (Cabrelles, Lerma, Navarro Tarín y Seguí, 2013, p.86).

Por ello, para completar la información, suelen combinarse los datos obtenidos en el escáner con la fotografía convencional, existiendo para ello diferentes formas de combinar.

La fotografía panorámica es un sistema que mueve el equipo de registro alrededor de un único punto, cubriendo la totalidad de la superficie con movimientos angulares horizontales y verticales, siendo más rápido que el tradicional sistema de fotografía en

paralelo¹⁹. Este tipo de fotografía registra una imagen desde un único punto de visión, que se convierte en una referencia absoluta para todas las imágenes, lo que deriva en que el programa de procesado pueda recalcular exactamente la posición de cada fotografía en el espacio sin necesidad de que exista una precisión exacta en el movimiento angular del cabezal panorámico mismo. La distorsión provocada en el escaneado paralelo desaparece debido a la distancia a la que se registra la superficie (Factum Arte s.f. e).

Otra opción es que la geometría del objeto 3D obtenida con el escáner se fusione con la textura obtenida en el modelo fotogramétrico (ver siguiente apartado), de modo que la precisión y la calidad del modelo aumenta notablemente para aquellas aplicaciones que requieren máxima calidad y detalle (Biosca et al., 2007), dado que se combina lo mejor de ambos procedimientos (Cabrelles, et al., 2013, p.86). En estos casos, se generan los modelos por separado, cada uno en el software correspondiente escogido, y se fusionan más tarde en el software fotogramétrico Agisoft Photoscan²⁰.

1. 4 Fotogrametría

En la actualidad, una de las técnicas más importantes empleadas para el estudio, difusión y reproducción del patrimonio es la fotogrametría, técnica en continuo desarrollo y de notable interés para su aplicación a objetos patrimoniales (Ávila, 2017, p.193).

¹⁹ El escaneado paralelo mueve en un plano el equipo de registro en un marco paralelo a la superficie del objeto, cubriendo la totalidad de la superficie, lo que se traduce en la toma de cada una de las fotografías a partir de su propio punto de visión, ya que el verdadero paralelismo ocurre solamente en el centro de cada una de estas imágenes y todo lo que rodea el centro se ve desde un ángulo. El proceso de escaneado es excesivamente lento. Para casos de superficies con relieve no se recomienda su uso, ya que lo que se ve a la derecha de una fotografía puede ser muy diferente a lo que se ve a la izquierda de la siguiente toma. Solo en el caso del escaneado de una superficie totalmente plana, el sistema paralelo puede en teoría conseguir mejor resolución que el escaneado panorámico (Factum Arte s.f. e).

²⁰ El programa es detallado más adelante.

1. 4. 1 Definición y clasificación

Son numerosas las definiciones de fotogrametría que pueden encontrarse en diferentes medios y publicaciones. Aun así, si se basa puramente en la etimología, la palabra compuesta deriva de 3 raíces griegas: *φωτος* (photos), que significa luz; *γραμμα* (gramma), que significa lo que está dibujado o escrito; y *μετρον* (metrón), que significa medir. De este modo, uniendo las 3 palabras, fotogrametría significa medir gráficamente por medio de la luz.

La Real Academia de la lengua española, RAE, define la fotogrametría como el procedimiento para obtener planos de grandes extensiones de terreno por medio de fotografías aéreas (Rae, 2016). Dado que la topografía no es objeto de interés, esta definición no es la apropiada para el estudio que aquí refiere. Por ello, se buscan otras vías para definir la fotogrametría. Así, Arcusa et al. (2016) citan la ASPRS, american society for photogrammetry and remote sensing, que publica en su *Manual of Photogrammetry, 4th Ed.*, de 1980, la siguiente definición de Fotogrametría: “El arte, ciencia y tecnología de obtener información fidedigna de los objetos físicos y del medio ambiente mediante procesos de registro, medición e interpretación de imágenes fotográficas y de modelos de energía radiante electromagnética y otros fenómenos”. (p.534)

Otra definición importante es incluida en Marra y Rojo (2011), dada en este caso por la ISPRS, international society for photogrammetry and remote sensing: “La fotogrametría es la ciencia de realizar mediciones e interpretaciones confiables por medio de fotografías, para de esa manera obtener características métricas y geométricas (dimensión, forma y posición) del objeto fotografiado”. (p.137)

A modo de sencilla definición, puede afirmarse, por tanto, que la fotogrametría digital es una técnica que se encarga de generar de forma semi-automática modelos tridimensionales a partir de fotografías, es decir, crea modelos en 3D a partir de imágenes 2D, para de esta manera obtener las ya mencionadas características geométricas de los objetos que representan. El resultado final es un modelo 3D con una textura fotorrealista y una geometría realmente cercana al modelo original (Arcusa et al., 2016, p.533).

Dado que actualmente existe la posibilidad de utilizar la propia cámara digital, tal como se indicará más adelante, la fotogrametría digital se presenta cada vez más como una herramienta popular, accesible y extendida entre conservadores, especialmente de los ámbitos de la arqueología y arquitectura (Ávila, 2017, p.193).

En la actualidad, los arqueólogos emplean un tipo de fotogrametría conocida como SFM, structure from motion, que permite el uso de cámaras digitales y procesadores de datos altamente automatizados, muchos de ellos de uso libre en la red, como se explicará más adelante. Esta tecnología es muy similar a la fotogrametría convencional, sólo que difiere de esta al permitir una mayor libertad a la hora de realizar la toma de imágenes. En la SFM la geometría de la escena, posiciones y la orientación de la cámara se resuelven de manera automática sin necesidad de especificar *a priori* las posiciones 3D conocidas. En lugar de ello, éstos se resuelven simultáneamente gracias a datos y características que los programas detectan automáticamente (Westoby, et al. 2012, p.300). Actualmente, los programas empleados resultan muy potentes y detectan puntos comunes entre las diferentes fotografías, incluso cuando estas presentan diferencias medias de color, iluminación, etc. Se comprueba, por tanto, que tal como ocurre con la fotogrametría tradicional, la SFM trabaja mediante el solape de las imágenes realizadas desde diferentes puntos de vista, por lo que, en esencia, se capturan múltiples vistas de un objeto a través de la cámara digital y el programa se encarga de identificar los puntos que presentan características comunes en el conjunto de imágenes (Micheletti, Chandler & Lane, 2015, p.1 y 2).

Hasta fechas recientes, el uso de la fotogrametría estaba limitado a geometrías que pudieran definirse a partir de pocos planos tales como las fachadas de edificios. Sin embargo, actualmente, con la aparición de este tipo de tecnologías, que están siendo bautizadas como escaneo basado en fotografías o escaneo fotogramétrico, es posible la documentación 3D de estructuras u objetos con formas que comúnmente denominamos “orgánicas” o aquellas cuya geometría presenta una gran complejidad.

Existen diversos tipos de fotogrametría:

- Fotogrametría analógica, en la cual el paso del modelo estereoscópico al plano se basa en la utilización de métodos mecánicos. Los sistemas analógicos emplean instrumentos denominados restituidores²¹, que reproducen, a escala, modelos virtuales del objeto. Estos aparatos identifican puntos homólogos por medio de la visión estereoscópica y de la marca métrica flotante, permitiendo la medición de las coordenadas espaciales de los puntos que pueden observarse en las dos imágenes.
- Fotogrametría electrónica, aquella en la que los sistemas óptico-mecánicos se sustituyen por un sistema informático encargado de la realización de los cálculos. Dentro de los métodos fotogramétricos electrónicos se pueden distinguir: la fotogrametría analítica, en ella se mide en la foto analógica mediante un método mecánico y se soluciona matemáticamente mediante el empleo del ordenador, por lo que el problema de intersección de haces es solventado mediante los modelos matemáticos, así como la corrección de errores sistemáticos empleados durante el cálculo; y la fotogrametría digital, que se caracteriza por utilizar información (imágenes) en formato digital. Con la aparición de la informática, que como bien es sabido permite una gran velocidad de cálculo, la imagen analógica se transforma en digital.

1. 4. 2 Antecedentes de la fotogrametría

Desde el origen de la fotografía y su aplicación a la técnica fotogramétrica, esta ha evolucionado considerablemente.

Ya en 1759 Johann Heinrich Lambert, físico y astrónomo francés, publica sus estudios referentes a los sistemas perspectivos y sus bases matemáticas sugiriendo que los principios de la perspectiva se podrían utilizar para el levantamiento de cartas de costa y otros casos análogos (Ferrer y Ruiz Bedia, 2006, p.109).

²¹ “La restitución trata el problema de obtener y almacenar las coordenadas de un determinado objeto, (...), a partir de las correspondientes fotocoordenadas refinadas que, a su vez, se han calculado a partir de medidas realizadas sobre las fotografías” (Buill, Núñez y Rodríguez J., 2003).

El paso definitivo lo dio poco después Niépce, químico, litógrafo y científico aficionado que inventó, junto a su hermano, un motor para barcos y que es conocido por ser el hombre que consiguió la primera fotografía completamente ya fijada en un soporte, dando por nombre al método heliografía. Junto al proceso de Daguerre, es el primer proceso fotográfico exitoso que se conoce. Niépce, interesado en la litografía, comenzó sus experiencias con la reproducción óptica de imágenes realizando copias de obras de arte, para lo cual empleaba dibujos realizados en piedra litográfica por su hijo. Sus primeros experimentos, en 1813, utilizaban gomas resinosas expuestas directamente a la luz del sol. (Eleukos, s.f.).

Por su parte Daguerre, que también había tenido la idea de captar las imágenes de la cámara oscura buscaba capturar imágenes, disponía polvos fosforescentes en el fondo de su cámara oscura y la imagen proyectada sobre este polvo quedaba visible durante varias horas antes de que desapareciese poco a poco. Niépce y Daguerre se asociaron para contribuir al desarrollo de la invención de la heliografía y este último proporcionó una importante contribución al nuevo método que ambos inventaron: el fisautotipo. Tras la muerte de Niépce, Daguerre continuó solo las investigaciones e inventó el Daguerrotipo, procedimiento fotográfico que agilizaba el proceso, puesto que el tiempo de exposición preciso para la captura de la imagen se reducía a algunos minutos. De este modo, el daguerrotipo provocó un inmenso entusiasmo en la sociedad (Photomuseum, s.f.).

Más tarde, en 1850, el francés Aime Laussedat desarrolla los primeros instrumentos y métodos apropiados para los levantamientos de fotogrametría, entonces llamada metrofotografía. Por tanto, Laussedat es considerado el fundador de la técnica de fotogrametría que fue empleada durante 50 años y se basaba en la utilización de dos vistas fotográficas de un mismo objeto. El proceso de esta técnica contaba con una dificultad que radicaba en la identificación del mismo punto del objeto en las fotografías tomadas desde diferentes lugares y puntos de vista (Ferrer y Ruiz Bedia, 2006, p.110).

Aunque sin obtener buenos resultados, en 1858 el arquitecto alemán Albrecht Meydenbauer se convierte, según Velilla (2000) en el precursor de la realización de los primeros ensayos de fotogrametría aplicada al patrimonio arquitectónico, al utilizar la fotografía en el levantamiento de planos de edificios. Comienza también a utilizar el término fotogrametría en alusión a la disciplina que lleva a cabo medidas indirectas del espacio que nos rodea utilizando fotografías (citado en Ferrer y Ruiz Bedia, 2006, p.111).

En 1867, él mismo diseña un modelo de cámara específico, gracias al cual su proyecto prospera y consigue que la fotogrametría tome fuerza y consistencia. En 1885 funda el Real Instituto de Fotogrametría de Prusia, en el cual trabaja hasta la II Guerra Mundial (Ferrer y Ruiz Bedia, 2006, p.111). Así, en la Alemania del Reich fue el encargado de documentar el patrimonio arquitectónico, constituyendo un catálogo de monumentos históricos que cuenta con más de 76.000 fotogramas, que posteriormente fueron empleadas para la reconstrucción tras los daños sufridos en las guerras mundiales (Buill et al., 2003, p.12).

Aún hoy se conserva buena parte de su archivo fotográfico, y se cuenta con cerca de 12.000 imágenes sobre placas de vidrio de 40x40 cm que sorprenden por su calidad. Tanto Laussedat como Meydenbauer utilizaban el llamado método de las intersecciones con el fin de conseguir así las medidas del objeto de estudio a partir de las fotografías. Para ello no solo era preciso conocer la posición exacta desde la que se ha capturado la imagen, sino también las direcciones de los ejes ópticos de la cámara (Almagro, 2004).

Basándose en este fenómeno, Stolze consigue resolver la citada limitación que la técnica presentaba: la identificación de puntos homólogos (puntos que en cada imagen corresponden a un mismo punto del objeto fotografiado). Para ello utiliza lo que vino a conocerse como marca flotante: una pequeña marca que, posicionada sobre cada imagen permite identificar los exigidos puntos homólogos en cada fotografía, gracias a que esas marcas se funden en una sola dentro de la visión estereoscópica (Almagro, 2004).

El inicio de la alta precisión en fotogrametría viene dado por Carl Pulfrich, que en 1901 diseña el estereocomparador, constituyendo el precursor de la fotogrametría analítica. Pero fue necesaria la aparición de elementos analógicos que constituyesen instrumentos de precisión, dada la complejidad y del cálculo fotogramétrico numérico, y, por consiguiente, la laboriosidad del proceso (Buill et al., 2003, p.12).

El estereocomparador permite la medición de coordenadas planas de los puntos homólogos en la imagen. Una vez estas coordenadas son conocidas, se obtienen las coordenadas espaciales de los puntos medidos mediante cálculo analítico (Almagro, 2004).

En 1908, el oficial de ingenieros austríaco Von Orel construye el primer estereoautógrafo, aparato de restitución que permitía el dibujo continuo y semiautomático. El objeto es observado en relieve a través del aparato y sobre un punto de dicho objeto se posa la marca flotante, para conseguir la posición de ese punto a escala sobre una mesa de

dibujo y en proyección ortogonal sobre uno de los planos de referencia del sistema de coordenadas adoptado (Almagro, 2004).

Por su parte, Castagnoli y Schmiedt (1957) afirman que fueron los primeros en emplear la fotogrametría en el ámbito de la arqueología en 1956 en Italia en un estudio de la ciudad de Norba (citados en Campana, 2014, p.9).

A partir de ese momento, la fotogrametría sigue el camino de la utilización de aparatos analógicos.

Como puede verse, por lo que a patrimonio respecta, la fotogrametría fue en un principio aplicada en el campo de la arquitectura.

Aunque desde su origen la teoría matemática de la fotogrametría ha sido de carácter tridimensional, el registro en la práctica ha tenido un carácter gráfico, es decir, bidimensional.

Dicha limitación conllevaba la realización del levantamiento fotogramétrico arquitectónico a través del sistema de proyección diédrico, siendo el único que permitía el registro métrico y a escala de las coordenadas X e Y. Solo *a posteriori* y mediante incorporación escrita, se podía añadir la profundidad de puntos determinados del valor de la coordenada Z. Por ello, sólo en ocasiones se intentó la representación tridimensional de objetos escultóricos (Cámara y Latorre, 2003, p.89).

Es muy frecuente encontrar cuantiosa información sobre el uso de la fotogrametría en proyectos de topografía y existen numerosas publicaciones a ellos referidos. Sin embargo, en las últimas décadas, las divulgaciones referentes a la fotogrametría aplicada a arqueología y arquitectura son cada vez más habituales.

1. 4. 3 Proceso fotogramétrico

Para comprender el proceso fotogramétrico deben explicarse una serie directrices y pautas que lleven a la correcta realización del levantamiento 3D.

1. 4. 3. 1 Planteamiento y captura de las imágenes

La captura de las fotografías constituye el punto de partida a la hora de llevar a cabo un levantamiento fotogramétrico. Este proceso es especialmente decisivo dado que para conseguir un riguroso modelo 3D del objeto a documentar es fundamental manejar de manera adecuada la metodología.

A continuación, se presentan algunas de las consideraciones fundamentales que el investigador debe tener en cuenta a la hora de abordar un levantamiento de este tipo. Estas recomendaciones han sido obtenidas a partir de diversas fuentes:

- . El curso online teórico-práctico *Introducción a la Fotogrametría digital y su uso en patrimonio (4ª Edición)*, que la autora de la presente tesis doctoral cursó del 24 de febrero al 22 de marzo de 2015. El curso fue impartido por la Universidad de Burgos y los docentes fueron Iván Díaz San Millán y Pablo Aparicio Resco.

- . El manual de Agisoft PhotoScan (Agisoft, 2016).

- . Las estrategias de captura para fotogrametría digital de la página web *Patrimonio Virtual* (2015).

Por otro lado, la puesta en práctica (ver capítulo 9) de las recomendaciones que a continuación serán expuestas por parte de la autora de la presente tesis doctoral avala su eficacia.

Así, en primer lugar, se ha de realizar un exhaustivo análisis del objeto a documentar, focalizando el estudio en:

- Las características volumétricas y de color de la pieza u objeto a documentar (una escultura, yacimiento, edificio, una pequeña pieza arqueológica, una portada de una iglesia...).
- Tipo de geometría que presenta.
- Medidas y posibilidades de rotar en torno a él.
- Puntos de captura necesarios a documentar y puntos de cámara a establecer.
- Establecer la necesidad de una o varias alturas de cada punto.
- Valorar la necesidad de emplear herramientas auxiliares: drones, pértigas, trípodes especiales, así como la posibilidad de su uso: costes, disponibilidad...

Por lo que al análisis del entorno respecta, se destaca la importancia de:

- Estudiar las características del entorno en el que va a ser fotografiada esta pieza (un estudio, una calle, el campo, un museo...). Este punto es fundamental para controlar: las características de la luz, las posibles interrupciones en el proceso de toma de datos, las condiciones medioambientales, etc...
- Plantear la existencia o no de obstáculos en el campo de visión. En caso afirmativo, será necesaria una planificación para salvar estos obstáculos rodeándolos y/o añadiendo un mayor número de fotos, o bien tener en cuenta si existe la posibilidad de eliminarlos.
- Realizar la toma de fotografías en horas en las que existe una buena iluminación.
- Si la zona presenta cierto tránsito (coches, personas...), ha de analizarse el momento de menor circulación y si esta puede ser cortada o modificada para mejorar las condiciones de trabajo.
- Es imprescindible la toma de fotografías bien iluminadas y sin cambios bruscos de luces-sombras.

El siguiente paso a seguir es la planificación y ejecución de la toma de imágenes. Se ha de plantear cuántas fotos son precisas, así como la posición desde la cual se van a

tomar las fotografías para cubrir todos los ángulos de la pieza. Es recomendable realizar un croquis donde aparezcan los distintos puntos de toma de imagen o “cámaras”.

Al documentar un objeto tridimensional, no sólo va ser necesaria la realización de una línea de imágenes, sino que esta debe repetirse distribuyendo las líneas en distintas alturas, de modo que la pieza quede documentada por todos y cada uno de sus ángulos. Las recomendaciones generales implican que todos los ángulos del objeto deben aparecer en un mínimo de dos imágenes diferentes para que exista solape entre las tomas.

Como se ha indicado, es recomendable la realización de un esquema que plantee dónde se va a colocar cada cámara para realizar la documentación y que incluya la disposición de los puntos de toma alrededor del objeto. Una estrategia es adaptar el recorrido de la toma de puntos siguiendo la geometría del objeto a digitalizar o hacer una línea de puntos de toma estándar y añadir tomas adicionales en zonas

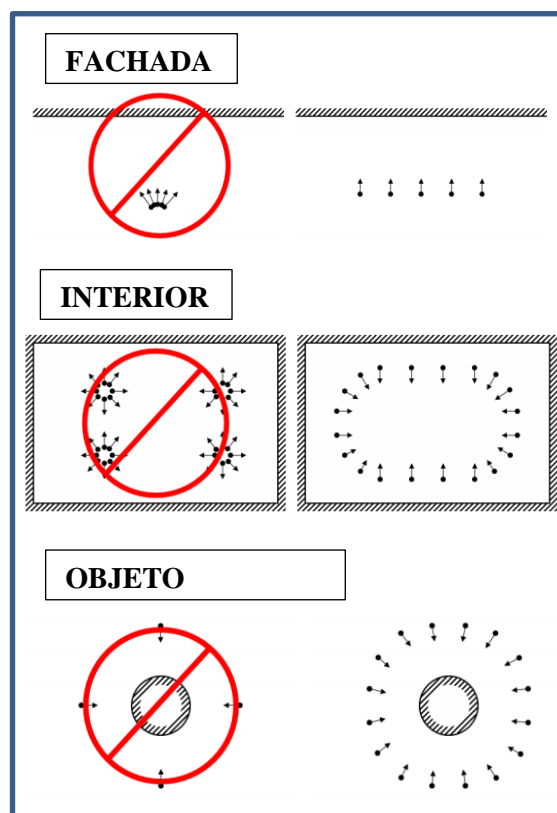


Fig. 22 En el manual de Agisoft Photoscan puede verse un esquema que muestra el modo correcto para capturar las imágenes con el fin de realizar el levantamiento fotogramétrico. En las imágenes de la parte de la izquierda puede verse el modo incorrecto de las tomas mientras que en el derecho aparece la forma correcta de realizarlas, según si el objeto de estudio es, de arriba abajo respectivamente, una fachada, un interior o un objeto aislado. ©Agisoft Photoscan.

específicas, como aquellas que se encuentren en sombra. Debe quedar claro que para que cualquier parte o elemento del objeto aparezca en el modelo 3D, siempre debe estar fotografiado y aparecer, al menos, en dos de estas fotografías, a fin de conseguir el solape mencionado.

El área de superposición entre imágenes es fundamental para obtener el modelo, como se ha venido reiterando. Esta zona, conocida como solapamiento entre imágenes, debe ser al menos del 60% para poder llevar a cabo la geometría con total garantía (Arcusa et al., 2016, p.535). Cuanto mayor sea ese porcentaje, la nube de puntos obtenida será más densa y precisa y, por lo tanto, mejores serán los resultados.

1. 4. 3. 2 Cámara e imágenes

Por lo que a la cámara fotográfica a utilizar respecta, puede afirmarse que, actualmente, cualquier cámara digital es válida para obtener un modelo. Es obvio que una cámara de mejores prestaciones proporciona imágenes más precisas, resultando a su vez, modelos tridimensionales más ajustados al objeto. Un detalle importante es que, durante la toma de las imágenes, la configuración de la cámara debe permanecer intacta; de lo contrario, la lente cambia y distorsiona parcialmente la imagen. Así, siempre que sea posible, la toma de imágenes se realiza en modo manual, pudiendo variarse el tiempo de exposición o la apertura del diafragma, pero no el zoom, y no deberían realizarse en modo automático. De esta manera, se necesitará un trípode y la cámara en modo de retardo de disparo.

Las imágenes deben estar siempre correctamente iluminadas y se ha de evitar el balance automático de blancos, así como eliminarlas en caso de que hayan salido borrosas, puesto que pueden generar fallos en la construcción de los triángulos de la malla. Deben contar siempre con claridad y buena resolución, por lo que la cámara debe ser configurada para que tome imágenes luminosas, pero sin llegar a quemarlas. El flash tampoco puede estar activado, ya que la luz debe ser la misma en todas las imágenes tomadas.

Tal y como ocurre con el registro mediante un escáner, la disposición de dianas de control es muy útil para ayudar al software a posicionar las cámaras en cada una de las capturas fotográficas (Arcusa et al., 2016, p.535).

Es recomendable almacenar los datos en archivos raw, dado que éstos no se cierran durante el procesado interno de la cámara; con ello se consigue que posteriormente puedan alterarse por medio de softwares cualquiera de los parámetros de la imagen, tales como la saturación de color, el contraste, la iluminación, la exposición, etc... para ajustar la imagen final a la realidad del objeto (Arcusa et al., 2016, p.535).

Esto es fundamental, puesto que una mejor calidad de las imágenes permitirá al software fotogramétrico tener más información y de mejor calidad a la hora de calcular el modelo 3D. La obtención de datos raw supone la posibilidad de procesarlos a partir de plataformas convencionales como Adobe Photoshop, y es muy probable que en el futuro puedan emplearse con una mayor resolución, puesto que surgirán nuevos programas de edición (Factum Arte, s.f. c).

Otra recomendación consiste en disponer de un portátil en la zona de trabajo para poder visualizar *in situ* las imágenes y comprobar así que la calidad de las mismas es la deseada.

Para documentar pequeños modelos, si las imágenes han sido bien capturadas, con una cantidad de 20 se puede obtener un buen modelo fotogramétrico (Arcusa et al., 2016, p.535). Sin embargo, es siempre preferible que el número de fotografías tomadas sea más alto del estimado, pese a que para generar el modelo no se empleen todas. De este modo queda asegurado que existe suficiente documentación y también se posibilita la selección de las mejores fotografías.

Ante todo, debe quedar claro que, dependiendo del proyecto, va a precisarse una calidad del modelo 3D u otra. Es posible que en ocasiones no sea necesaria la generación de modelos tridimensionales de gran peso, por lo que hay que tener siempre en cuenta la finalidad del modelo fotogramétrico. Si el objetivo es la obtención de un “boceto” en 3D de cierto objeto o un modelo geoméricamente no muy preciso puede emplearse incluso la cámara de un dispositivo móvil. Sin embargo, si se busca un modelo preciso de calidad, la cámara empleada ha de ser preferiblemente una cámara réflex o una buena compacta para tomar las imágenes.

1. 4. 3. 3 Softwares fotogramétricos

Una vez se dispone de todas las imágenes, estas deben ser cargadas en un software fotogramétrico. Este tipo de programas se encargan de calcular de manera automática dónde se encontraba la cámara para unir así los puntos coincidentes en las fotografías.

Existen dos tipos de *softwares*: el de cálculo en la nube y el de escritorio.

1. 4. 3. 3. 1 Softwares de cálculo en la nube

Los softwares de cálculo en la nube, es decir a través de Internet, permiten obtener visualizaciones y archivos 3D sin necesidad de adquirir equipos o programas más sofisticados, ni tan siquiera contar con un ordenador de altas prestaciones. Éstos realizan el cálculo fotogramétrico en servidores dedicados en la red, por lo que no es necesario disponer de un equipo personal de alta gama. Estos programas permiten la obtención de levantamientos fotogramétricos de calidad media sin necesidad de emplear un gran equipo, ya que las herramientas informáticas que se encargarán de generar el modelo 3D se encuentran en servidores externos, es decir, en otros ordenadores. Dichos servidores cargan las imágenes a partir de las cuales generan y exportan el modelo, que posteriormente es enviado al usuario. Este tipo de software se encarga del envío de las imágenes, la visualización y la edición del modelo 3D, permitiendo que después este sea exportado, generalmente con formato .obj. y constituyen herramientas de gran utilidad, dado que en su mayoría permiten grandes prestaciones de forma totalmente gratuita.

Sin embargo, al ser automáticos, se presenta como inconveniente la imposibilidad de establecer la densidad de malla o la cantidad de polígonos necesarios. Además, en muchas ocasiones, este tipo de software cuenta con un límite máximo del número de las imágenes que se envían al servidor, así como un tamaño máximo de las mismas por lo que, ante la limitación del número y calidad de imágenes, no proporcionan modelos con la misma calidad que los obtenidos gracias a softwares de escritorio.



Fig. 23 Visualización 3D en Autodesk 123D Catch de una escultura de la Facultad de Bellas Artes de la Universidad Complutense de Madrid, generada con la aplicación tomada desde el dispositivo móvil de la autora de la presente tesis doctoral. A la izquierda, puede verse el modelo tal y como la aplicación lo genera: con el entorno incluido; a la derecha aparece el modelo recortado del fondo para facilitar la comprensión del mismo. ©María Ávila Rodríguez.

Como ejemplo, puede citarse la aplicación Autodesk 123D Catch, que es compatible con Apple, Android y Windows, por lo que puede ser instalada no solo en ordenadores, sino también en tabletas y dispositivos móviles de última generación. Siguiendo unas sencillas instrucciones en las que se indica cómo y cuántas fotografías han de ser realizadas, la aplicación se encarga de generar la visualización 3D a partir de los datos incorporados por el usuario (Autodesk 123D Catch, 2016).

1. 4. 3. 3. 2 Softwares de escritorio

Por su parte, los softwares de escritorio o aplicaciones de escritorio son aquellas que realizan el cálculo fotogramétrico en base a los propios recursos del equipo personal, por lo que en este caso se requiere disponer de un equipo de altas prestaciones. Una de las grandes ventajas frente al empleo de los softwares de la nube es que, al contrario que éstos últimos, posibilitan una amplia capacidad de control durante el proceso de creación del modelo fotogramétrico, puesto que entre fase y fase el usuario interactúa con el software ordenando el siguiente paso, y en cada uno de ellos se permite realizar determinados cambios y modificaciones, como escoger la densidad de la nube, cantidad de triángulos, etc., por lo que supone una ventaja muy destacable frente a las anteriores aplicaciones.

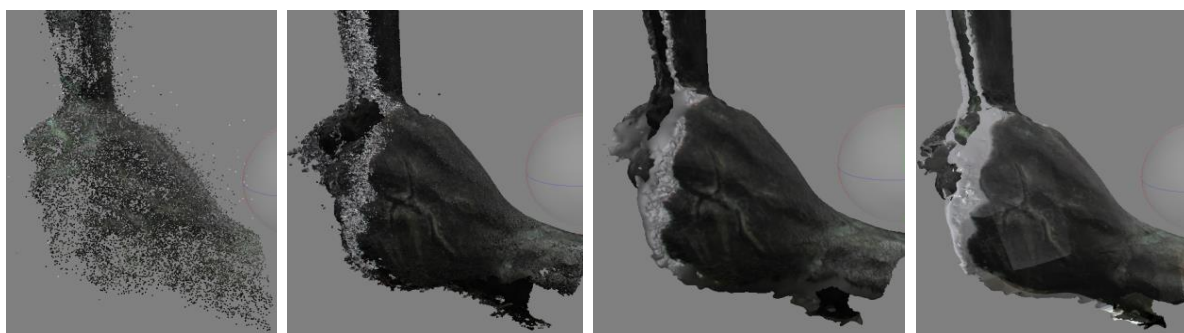


Fig. 24 La zona de la mano de la escultura que aparece en las imágenes no fue correctamente digitalizada dado que no presentaba relevancia alguna para el estudio que se estaba realizando. Por ello, al generarse el modelo, tal y como puede verse en la secuencia de imágenes, se produce una gran pérdida de información, que se presenta como agujeros generados en la malla. © María Ávila Rodríguez.

Generalmente, el proceso para la creación del modelo tridimensional es el mismo en todos los softwares de este tipo y consta de diferentes fases: la creación de la nube de puntos, la de la geometría y el texturizado del modelo (Aparicio, 2015).

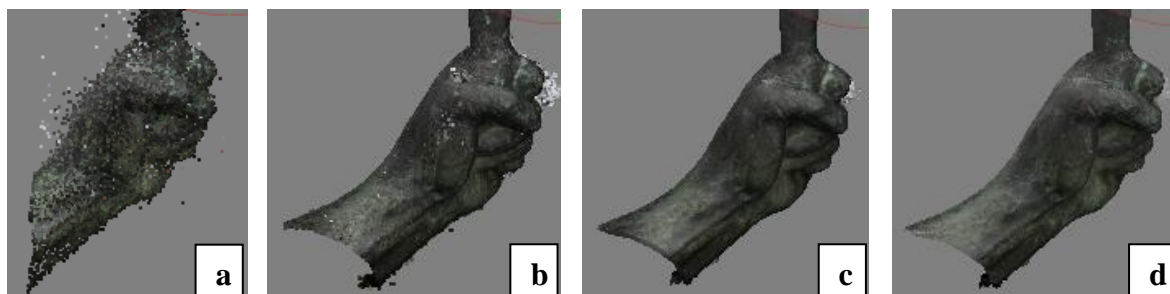


Fig. 25 Mano de una escultura digitalizada (más detalles en capítulo 9): a) Nube de puntos; b) Nube de puntos densa; c) Malla y d) Malla texturizada. © María Ávila Rodríguez.

Agisoft Photoscan obtiene el modelo tridimensional en cuatro fases:

- El primer paso, tras incluir las fotografías de las cuales se quiere obtener el modelo, es alinearlas. En esta fase se obtiene la primera nube de puntos dispersa, que tal y como ocurre al digitalizar con escáner, se compone por los puntos que han sido registrados.
- En la siguiente fase se obtiene la nube de puntos densa, que proporcionará un mayor número de referencias en la fase posterior de procesado que definirá la malla del objeto. Para ello, el programa se encarga de calcular la información de profundidad para cada imagen y después la combina en una única nube de puntos densa (Arcusa et al., 2016, p.536).
- La malla surge entonces al alinear las tomas en un sistema de coordenadas común a todas ellas (Esquivel et al., 2012, p.2175), es decir, a partir de la nube de puntos, el software genera la malla que constituye la geometría 3D del modelo.
- Por último, el software se encarga de realizar el texturizado del modelo asociando las imágenes fotográficas con la malla creada en la fase anterior (Arcusa et al., 2016, p.536).

En la generación de modelos con softwares de escritorio no existe un límite de imágenes ni de calidad de las mismas; sin embargo, se ha de tener en cuenta que, cuantas más imágenes y de mayor calidad se empleen, serán necesarios más recursos para poder

llevarlo a cabo y el cálculo del mismo será mucho más lento. Por supuesto, los resultados mejoran a medida que el número de imágenes y calidad aumentan.

Esta es una de las razones por las que en ocasiones es recomendable realizar los modelos fotogramétricos por partes, generando grupos de imágenes que se conocen como *Chunks*. Estos son alineados, subdivididos en grupos y cuando se ha obtenido la nube de puntos y las mallas, estas son fusionadas para formar un solo modelo, ya sea dentro del propio software fotogramétrico, o en otros softwares de edición de modelos 3D.

Como puede comprobarse, este tipo de software tiene el inconveniente de requerir un buen equipo informático para realizar un modelo fotogramétrico de alta calidad, ya que todos los cálculos se van a hacer en el equipo en el que esté instalado el software. Así mismo, suele generalizarse un aumento en el tiempo de generación del modelo 3D, ya que no se encarga una red de equipos, sino un solo ordenador que realiza todos los cálculos. Como ejemplo, puede citarse el software Agisoft PhotoScan, que ofrece una amplia cantidad de prestaciones que lo convierte en una de las herramientas más potentes del mercado. Otra característica que lo hace atractivo es que cuenta con una interfaz sencilla de manejar (Arcusa et al., 2016, p.536). Este programa realiza el procesamiento fotogramétrico de imágenes digitales, genera datos espaciales 3D y puede, además, ser manejado tanto por usuarios con escasa formación en el campo fotogramétrico, en su versión estándar, como por especialistas en su versión profesional, que permite ajustar el flujo de trabajo a numerosas tareas específicas y distintos tipos de datos. El programa es gratuito y, en caso de necesitar la versión profesional, puede instalarse a modo de prueba durante 30 días sin coste alguno. Trascurrido ese

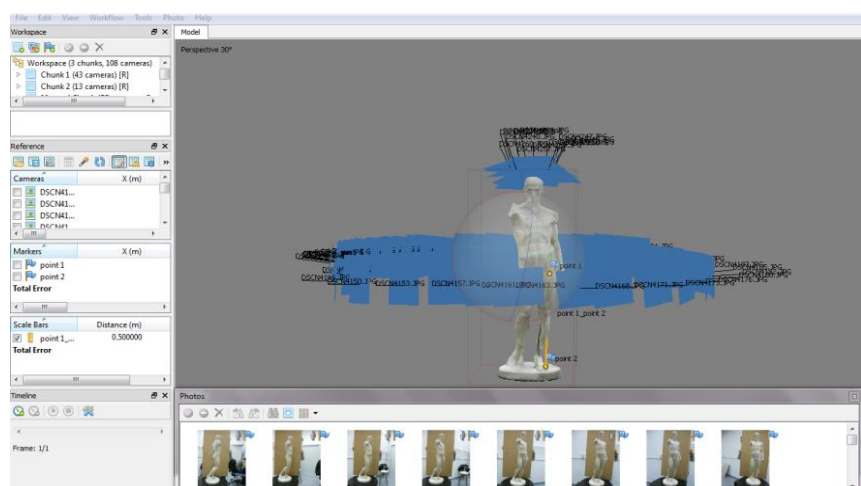


Fig. 26 Modelo 3D generado en el software de escritorio Agisoft PhotoScan, de la misma escultura que la figura 23. Los elementos azules que aparecen corresponden a las posiciones de las cámaras cuando se tomaron las imágenes. El software se encarga de calcularlas. Además, aparece el nombre de la imagen correspondiente a cada cámara. ©María Ávila Rodríguez.

periodo, se pueden abrir los modelos generados, pero no realizar nuevos. En la página web pueden descargarse también de forma gratuita manuales de las dos versiones en inglés y ruso, así como diferentes tutoriales para facilitar la comprensión por parte del usuario (Agisoft Photoscan, s.f.).

1. 4. 3. 4 Registro del levantamiento

Del mismo modo en que al realizar una intervención sobre una obra de arte se lleva a cabo un informe de conservación-restauración, es muy recomendable, dado que no existen leyes ni protocolos de actuación, que al realizarse un levantamiento fotogramétrico se cumplan una serie de pautas²²:

- Realizar una ficha o dossier del elemento a documentar. Puede ser una ficha informática que recoja los datos principales del objeto, edificación, etc., datos que ayuden a contextualizar el levantamiento 3D.
- Registrar datos tales como: fecha de levantamiento fotogramétrico, tiempos de realización de cada uno de los pasos, tipo de cámara, calidad de las imágenes, características del hardware y software y, en definitiva, todo aquello que se presente relevante para complementar una futura información.
- Acompañar esta ficha con el modelo 3D generado, así como con las imágenes utilizadas en el proceso. De este modo, se garantiza la posibilidad de recalcular el modelo fotogramétrico en un futuro con toda la información gráfica original.
- Permitir, siempre que sea posible y conveniente, el libre acceso a estas fichas para que otros investigadores puedan adquirir el modelo y sus características.

²² Curso online teórico-práctico *Introducción a la Fotogrametría digital y su uso en patrimonio (4ª Edición)*, impartido por la Universidad de Burgos cuyos docentes fueron Iván Díaz San Millán y Pablo Aparicio Resco.

Es imprescindible, y por ello la petición es cada vez más frecuente, que se implementen, normalicen y regularicen protocolos de actuación, con el fin de emplear esta técnica de un modo habitual en los trabajos de conservación y restauración del patrimonio. Por ello, cuanto más riguroso sea el trabajo, más demostrada quedará la viabilidad de su uso en el patrimonio como un trabajo científico.

1. 4. 3. 5 Fotogrametría involuntaria

Los diferentes softwares fotogramétricos son cada vez más potentes y permiten realizar levantamientos con fotografías de cámaras sin calibrar, tomadas desde un dispositivo móvil e, incluso, como ya se ha indicado, desde cámaras diferentes y tomadas en momentos distintos.

Por ello, ha surgido una nueva disciplina conocida como fotogrametría involuntaria. Esta se realiza fundamentalmente a partir de imágenes de archivo que por supuesto no se realizaron con el propósito de crear modelos 3D. De estas fotografías se recupera y extrae la posible información tridimensional existente. Así, se pueden obtener datos geométricos que no quedaron reflejados en los dibujos o fotografías realizados en campo e incluso, recuperar información geométrica en 3D que actualmente no exista en el original porque esta haya desaparecido por diferentes motivos (Aparicio, Carmhona, Fernández Díaz y Marín, 2014).

La mejora de los softwares fotogramétricos conlleva que la técnica de fotogrametría involuntaria vaya evolucionando también y surge así, cada vez con mayor calidad, la posibilidad de obtener información útil y relevante para según qué casos. Sin embargo, en numerosas ocasiones, los resultados obtenidos no son excelentes, dado que estos dependen directamente del número y la calidad de las fotografías.

1. 4. 4 Escáneres *versus* fotogrametría

El primer punto a tratar en este epígrafe, que trata de comparar ambos métodos de digitalización, es la característica común a ambas técnicas de constituir sistemas no invasivos, puesto que en ningún momento hay contacto con la obra original. Este punto es fundamental a la hora de trabajar en el ámbito del patrimonio, sensible, en muchos casos, al deterioro.

La fotogrametría generalmente constituye una técnica más económica que el escaneado puesto que, como se ha indicado, con una cámara digital se pueden obtener buenos resultados, disminuyendo los costes implicados en la compra o alquiler de un escáner.

Aunque bien es cierto que cada vez los escáneres funcionan con mayor rapidez, con ellos se precisa una mayor preparación y dedicación al planteamiento del proceso, por lo que ralentiza el trabajo.

La ventaja de la fotogrametría frente a cualquier otro sistema de levantamiento reside en que el tiempo empleado en el trabajo de campo se reduce considerablemente, puesto que este consiste en la realización de un conjunto de fotografías cruzadas que han de ser estratégicamente tomadas con el fin de abarcar por completo el objeto de estudio. Como ya se ha explicado, esto es necesario para que las fotografías cuenten con buenos solapamientos y puntos claros de identificar (Natividad y Calvo, 2010, p.10).

Sin embargo, el escaneado consigue una precisión muy alta, aunque deficiente en cuanto a textura. Como se ha indicado a lo largo del capítulo, algunos incluyen ya cámaras HD integradas, pero son pocos y más costosos. Por su parte, los modelos obtenidos mediante fotogrametría, al ser contruidos mediante fotografías, presentan textura; sin embargo, las mallas obtenidas incluyen una cantidad de puntos considerablemente menor, lo que se traduce en una disminución de la precisión del modelo. Por ello, la malla de fotogrametría es más fácil de manejar y trabajar con ella en diferentes programas ya que cuenta con menos puntos, por lo que el número de decimales y de polígonos es menor y los archivos pesan menos que en el caso del escáner. Estas características que presentan estas mallas, por tanto, dan lugar a que la velocidad y la comodidad de trabajo sean mayores.

Como contrapartida, presentan una precisión menor por lo que, dependiendo de los objetivos necesarios, puede suponer un inconveniente.

Ambas tecnologías dependen directamente del entorno en el que se encuentren, puesto que la luz constituye un factor fundamental en los sistemas ópticos y, si hay un exceso de luz, ni las fotografías ni las capturas del escáner darán buenos resultados. Por el contrario, si hay un exceso de oscuridad, ninguna de las dos técnicas será capaz de obtener los datos correctamente.

Existe una variedad de métodos para obtener la información 3D de los modelos; cada uno de ellos presenta ventajas y limitaciones. La dificultad está en identificar el sistema que debe emplearse en cada situación. Como ya se ha indicado, actualmente no existe un sistema que ofrezca todas las prestaciones necesarias (Factum Arte s.f. b).

Dada la comparativa realizada entre escáneres y fotogrametría, puede afirmarse que la fotogrametría cada vez es más empleada en diferentes disciplinas por su bajo coste y la calidad de los resultados obtenidos. Por ello, cuando no sea necesario un elevado nivel de precisión y el modelo a documentar sea de reducidas dimensiones, la fotogrametría puede ser una buena alternativa. Además, es fundamental destacar que, empleando la fotogrametría a corta distancia y con cámaras de última tecnología, se pueden obtener resultados de muy alta resolución.

Sin embargo, si se trata de digitalizar monumentos o zonas de gran tamaño y dimensiones, así como edificios o elementos arquitectónicos que cuenten con dificultades de acceso, los Sistemas LIDAR suponen mayor precisión, eficacia y rapidez frente a otras técnicas de documentación (Hung-Ming et al., 2010, p.2). A pesar de lo indicado, cada vez más hoy en día es muy frecuente la digitalización de yacimientos arqueológicos mediante la fotogrametría.

Capítulo 2. Modelado y post-procesado 3D del modelo

Un modelo 3D puede obtenerse, tal y como se ha indicado ya en el capítulo precedente, con las técnicas descritas (escáner 3D, fotogrametría); sin embargo, existen casos en los que no existe materia física que digitalizar, por lo que se ha de recurrir entonces al modelado en 3D. Este puede definirse como aquel proceso mediante el cual en un software especializado se desarrolla una representación matemática.

Sin embargo, desde el punto de vista artístico y patrimonial, es el proceso mediante el cual el lenguaje geométrico, obtenido por las mediciones tomadas en el proceso de escaneado o bien mediante fotogrametría, entre otros, se traduce en un lenguaje gráfico visual. Dicho lenguaje es universal y, puede decirse que es independiente del nivel de instrucción del usuario final, puesto que la representación ha sido realizada por medio de modelos evocadores y visuales (Valle y Rodríguez Miranda, 2011, p.148).

Las herramientas de modelado y edición 3D constituyen una constante hoy en día y el mercado de software ofrece un conjunto muy amplio de soluciones para fines muy diferentes, dirigidos al más variado público (Cignoni et al., 2008, p.1).

Los programas de s 3D no solo son empleados para la creación de modelos patrimoniales 3D, sino que es fundamental destacar que aquella documentación del patrimonio cultural que ha sido registrada *in situ* ha de procesarse (Mañana-Borrazás, Rodríguez Paz y Blanco-Rotea, 2008). De este modo para la obtención de un modelo 3D definitivo compatible con las aplicaciones posteriores para las que ha sido generado es preciso el postprocesado del mismo mediante programas informáticos específicos (Arcusa, 2016, p.536). La dificultad y el coste en tiempo del proceso, dependerá de la información de partida y del tipo de objeto 3D que se ha de generar, es decir, de la aplicación posterior

hacia la que está dirigida la génesis del objeto (Díaz, Jiménez, Barreda, Asensi y Hervás, 2015, p.33).

Los modelos 3D, tal y como podrá observarse en próximos capítulos, podrán también ser impresos. Sin embargo, antes de materializar un objeto, es fundamental tener en cuenta fiabilidad de los datos obtenidos, que no sólo está ligada a la calidad del dato de base, sino también a la fase de procesado (García-Gómez, Fernández de Gorostiza y Mesanza, 2011, p.31).

Para comprender la trayectoria que los programas de modelado 3D han tenido, así como el impacto que causaron y causan hoy en día, a continuación, se desarrollan los antecedentes del modelado 3D.

2. 1 Antecedentes. Sistemas DA y modelado sólido

Las siglas DA, Diseño Asistido, son también conocidas como CAD, que tienen origen anglosajón y hacen referencia a la denominación computer aided design, es decir, diseño asistido por ordenador.

El DA mejora la documentación y productividad de los proyectos llevados a cabo, puesto que se obtienen archivos más precisos, más fáciles de modificar, generan también flujos de información a otras fases del proyecto y, sobre todo, se experimenta una mejora clara del diseño y los dibujos (Baldasano, Gassó y Colina, s.f.).

Las primeras máquinas de diseño asistido eran grandes y costosas, aptas sólo para grandes empresas de arquitectura y de ingeniería, dada la dificultad que presentaban para ser utilizadas (Eiteljorg, 1988); sin embargo, dado el desarrollo producido en los instrumentos informáticos en los últimos años, los sistemas DA ocupan hoy día un lugar destacado en las empresas de ingeniería, en la gestión y comunicación de la información y de los conocimientos, en la planificación y gestión de proyectos y en la visualización 3D

(Baldasano et al., s.f.). Así, estos programas son realmente útiles a la hora de trabajar con objetos tridimensionales, ya sean de menor o mayor tamaño (Eiteljorg, 1988).

De este modo, con estos programas se diseñan y confeccionan la mayoría de los productos de uso diario que forman parte de la vida del ser humano en la actualidad.

La tecnología DA ha constituido un hito para el sector de la ingeniería, la arquitectura y la construcción. La principal ventaja y novedad que presentó fue la eliminación de la necesidad de dibujar a mano planos, diseños de piezas y, sobre todo, las perspectivas 3D, basadas entonces en técnicas de dibujo lentas, laboriosas y no interactivas, por lo que no podían efectuarse cambios en los dibujos con la sencillez que proporcionaba el diseño asistido. A su vez, este constituye una herramienta relativamente sencilla para la visualización 3D (Baldasano et al., s.f.).

Ya en los años sesenta, los profesionales informáticos comenzaron a desarrollar programas con el fin de ayudar a los arquitectos en la producción de dibujos de grandes dimensiones y especialmente complejos para la construcción de grandes edificios. Estos programas proporcionaron la creación automática de formas como líneas, círculos, arcos, líneas de cota, etc., y proporcionaron a los arquitectos la capacidad de editar sus dibujos de un modo similar a como lo hacen los procesadores de texto con las palabras escritas (Eiteljorg, 1988).

Fueron numerosas las personas e instituciones que a lo largo del s. XX trabajaron en la idea de diseñar mediante gráficos por ordenador. Sin embargo, son numerosas las fuentes que destacan al Dr. Ivan Sutherland como el primero en conseguirlo.

En 1963, este ingeniero llevaba a cabo uno de los proyectos que más repercusión ha tenido en la historia de la ingeniería moderna, al desarrollar Sketchpad (González, J., 2013), primer sistema gráfico de diseño asistido por ordenador (Castor, s.f.), considerado como el



Fig. 27 Ivan Sutherland manipulando el sistema en 1963. © Juan Carlos González.

antepasado de los programas modernos de DA, así como un gran avance en el desarrollo de

la informática en general (DigitalOcean, 2016). El programa desarrollado constituye uno de los más influyentes por su contribución aportada al estudio de la computación gráfica y la interacción con ordenadores, introduciendo, además, conceptos como el modelado 3D, simulaciones visuales, diseño asistido por ordenador (DA), realidad virtual, etc (History Computer, s.f. b).

Con la realización de su Tesis doctoral en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, a la que puso por título *Sketchpad: A man-machine graphical communications system*, creó una interfaz gráfica que posibilitaba el diseño de objetos en un ordenador (González, J., 2013).

El sistema Sketchpad utilizaba el dibujo como un nuevo medio de comunicación con un ordenador, dado que contenía programas de entrada, salida y computación que le permiten interpretar la información obtenida directamente en una pantalla de ordenador (Sutherland, 2003, p.9). Tal y como se explicará a continuación, los dibujos realizados podían bien ser manipulados, duplicados y/o almacenados, por lo que el sistema abrió la puerta a la computación gráfica, incluyendo, además, entre otras novedades, la aparición de la memoria para almacenar objetos dibujados, la construcción de líneas más sencillas, la capacidad de acercar o alejar la pantalla y nuevas técnicas para hacer líneas, esquinas y juntas perfectas (American Machinist, 1998). El sistema almacenaba la información referente a los dibujos de dos formas separadas: una era una tabla de visualizaciones de los puntos de coordenadas, diseñada para hacer que la visualización se produjese tan rápido como era posible; y el otro era un archivo diseñado para contener la topología del dibujo (Sutherland, 2003, p.37).

Sketchpad funcionaba en el ordenador Lincoln TX-2, una máquina entonces innovadora diseñada en 1956 y que empleaba el dibujo como un nuevo medio de comunicación con el ordenador puesto que el sistema contenía programas de entrada, salida y computación que le permitían interpretar la información dibujada directamente en la pantalla (History Computer, s.f. b). Ivan Sutherland fue incluyendo mejoras posteriores en este y otros sistemas, puesto que jamás se alejó de la investigación.

Actualmente sorprende ver las primeras imágenes conocidas de Sketchpad, en las que puede apreciarse en 1986 a un joven Alan Kay (informático estadounidense ampliamente reconocido por sus trabajos pioneros en la programación orientada a objetos y el diseño de sistemas de interfaz gráfica de usuario, que fue alumno de Sutherland),

narrando las imágenes de principios de los 60 que él mismo muestra al público (Carrol, 2007). En ellas puede comprobarse como con Sketchpad surgió la posibilidad, hasta ese momento inalcanzable, de crear dibujos de ingeniería directamente en un CRT²⁴ empleando un lápiz de luz. No solo se formaban líneas y figuras, sino que, por ejemplo, posicionando el bolígrafo en uno de los extremos de la figura, era posible desplazar sus lados y ejes, diseñando así la forma deseada del mismo. De este modo, si el usuario movía un vértice de un polígono, ambos lados adyacentes se movían; si lo que movía era un símbolo, todas las líneas unidas a este, se movían automáticamente. También era posible mover partes del dibujo; para ello el usuario indicaba las condiciones con el lápiz y los botones. Por ejemplo, si se querían conseguir dos líneas paralelas, se apuntaba sucesivamente a las líneas con el lápiz y se presionaba un botón (History Computer, s.f. b).

El funcionamiento básico del sistema lo explicó el propio Sutherland en un vídeo grabado por un programa televisivo de los 60 (Bigkif, 2007), en el que comentaba además cómo el dibujo de líneas convencionales había cambiado y podía considerarse 3D gracias al sistema de diseño que permitía a los usuarios dibujar puntos, segmentos de línea y arcos circulares que configuraban las figuras. El lápiz se posicionaba directamente encima de la pantalla, y se dibujaban las líneas y figuras deseadas. En la pantalla podían observarse en todo momento las figuras que el lápiz había trazado durante el proceso, por lo tanto, Sutherland cambiaba la manera en la que los sistemas manejaban tanto las entradas del usuario, como las salidas del sistema.

Por tanto, el lápiz de luz se empleaba, tanto para posicionar partes del dibujo en la pantalla, como para señalarlas o cambiarlas de posición. Además, un conjunto de botones controlaba los cambios que se deseaban realizar, como borrar, mover, etc. La información podía incluir segmentos de línea recta o bien arcos de círculos, a partir de los cuales se podían definir diferentes símbolos. El usuario podía de este modo definir y utilizar tantos símbolos como deseara y cualquier cambio en uno de los símbolos aparecía de inmediato en la pantalla (History Computer, s.f. b).

La verdadera importancia de este trabajo no radica meramente en la complejidad de la creación del software, sino en que cambió el modo de interactuar con las máquinas. Más allá de los números y los lenguajes de programación, Sutherland modificó así el lenguaje

²⁴ CRT, del inglés Cathode Ray Tube, engloba genéricamente a los monitores basados en un tubo de vacío donde un haz de electrones pinta la imagen en la pantalla. Las pantallas de ordenador generalmente son de CRT (Mastermagazine, s.f.).

de programación conocido hasta el momento, basado en números, y dotó la interfaz con elementos figurativos que ayudaban notablemente la comprensión del usuario, facilitando el trabajo visual. De este modo cualquier persona, sin importar el nivel de su formación, podía hacer uso del software. El legado de su trabajo se mantiene en todas las interfaces visuales empleadas en la actualidad, puesto que a pesar de que estas hayan, lógicamente, evolucionado, se mantienen los pilares fundamentales del DA original (González, J., 2013). Además, el empleo del lápiz de luz o lápiz óptico supuso toda una revolución, siendo este el predecesor del ratón, dado que permitía al usuario señalar e interactuar con los objetos mostrados en la pantalla. De este modo, se anticipó el modo de interactuar con el ordenador, puesto que haciendo clic en un botón se seleccionaba un objeto y este podía ser arrastrado para modificarlo (Sutherland, 2013, p.3).

Ya trabajando como profesor asociado en Harvard en 1967, Sutherland y un alumno, Bob Sproull, modificaron un sistema ya existente por el cual un piloto de helicóptero posicionaba una cámara moviendo su cabeza. Su nuevo sistema permitía a los usuarios ver y navegar en un ambiente 3D generado con ordenador. Sutherland y su pupilo continuaron investigando y consiguiendo mejoras hasta que, en 1996, implementaron un sistema de realidad virtual. El sistema permitía a los usuarios, simular que entraban a una habitación y que podían mirar en todas direcciones mediante el empleo de un casco (American Machinist, 1998).

Debe destacarse como, transcurridos 40 años, Sutherland realizó un informe técnico basado en su tesis doctoral en el que explica como a lo largo del tiempo se ha comprobado que las propiedades de los dibujos realizados por ordenador difieren notablemente de los realizados sobre papel no sólo por la precisión, facilidad de dibujo y velocidad de borrado proporcionada por el ordenador, sino principalmente por la capacidad de mover piezas del dibujo sin la necesidad de borrarlos. Además, afirma que, si este sistema de trabajo no hubiese sido desarrollado, el pensamiento humano estaría demasiado influenciado por el dibujo en papel y muchos de los útiles servicios que los ordenadores proporcionan no habrían sido jamás imaginados (Sutherland, 2003, p.9).

Estos primeros trabajos de Sutherland se desarrollaron en dos dimensiones, sin embargo, rápidamente aparecieron la tercera dimensión y el modelado sólido, con Arístides Requicha y Herbert Voelcker (1978). Gracias a ellos se crearon los primeros

algoritmos matemáticos del modelado sólido, que surgió como medio de comunicación entre los sistemas de DA y las máquinas CNC (citado en Domínguez, I. A., Romero, Espinosa y Domínguez, M., 2013, p.41).

Un modelo sólido es una representación digital de las partes sólidas de un objeto, que muestra su geometría en tres dimensiones. Durante los años 80 la mayoría de los sistemas geométricos empleados en DA y FA²⁵ desarrollaban representaciones definidas por un conjunto de curvas y superficies que debían definirse en un solo objeto sólido. Por ello generalmente se debía contar con la asistencia humana para suministrar la información que pudiese faltar o bien para resolver incoherencias (Requicha, 1980, p.437).

En 1983, la empresa IBM lanza el programa de modelado WINchester Solid Modelling, conocido como WINSOM, siendo el primero en permitir la manipulación de grandes modelos eficientemente. Tal y como se explica en una revista de finales de los 80 (Burridge et al., 1989) publicada por la empresa, el sistema era capaz de representar una gran cantidad de formas, operar con curvas y mezclas de formas, todo ello gracias al lenguaje ESME, Extensible Solid Model Editor, entonces recientemente implementado. El sistema se distinguía de otros sistemas por contar con numerosas novedades y opciones hasta el momento difíciles de encontrar, tales como, entre otras, diferentes posibilidades de renderizado²⁶ y la creación de animaciones, así como el empleo de su propio lenguaje ESME. La primera aplicación de WINSOM en un contexto arqueológico fue la reconstrucción de la catedral sajona de Winchester (Ver capítulo 7).

Por su parte el Sistema de Modelado Geométrico, SMG, permite añadir, almacenar y modificar representaciones de objetos (Requicha, 1980, p.437). Éstas representaciones pueden ser creadas por el usuario a través de una GUI, Graphical User Interface, o bien mediante una API, Application Programming Interface, que constituyen un conjunto de subrutinas, funciones y procedimientos que ofrecen una biblioteca que puede ser empleada por otro software como una capa de abstracción.

²⁵ Las siglas FA hacen referencia a la fabricación aditiva, desarrollada en profundidad en el siguiente capítulo. La FA en inglés es conocida como CAM (Computer Aided Manufacturing), es decir, manufactura o fabricación asistida por ordenador.

²⁶ Renderización viene del vocablo inglés rendering y define el complejo proceso de cálculo desarrollado por un ordenador destinado a generar una imagen 2D a partir de una escena 3D de modo que podría decirse que en el proceso de renderización, el ordenador "interpreta" la escena 3D y la plasma en una imagen 2D. También se emplean coloquialmente los términos "renderizar" y "renderizado" (Zapatero, 2007, p.355).

De este modo, generalmente son usadas en las bibliotecas de programación. Es común que el usuario seleccione y manipule formas primitivas tales como un cilindro o una línea y realice operaciones de modelado que, combinadas, transforman estas formas primitivas en representaciones más elaboradas (Rossignac & Requicha, s.f. 2).

Las técnicas de modelado de sólidos 3D fueron desarrolladas principalmente por ingenieros para realizar funciones de análisis en modelos resultantes y requerían un proceso orientado a la producción de representaciones de sólidos (Reilly & Shennant, 1989, pp.158 y 159).

Otra figura fundamental en la evolución del modelado 3D es el ya citado Alan Kay, que en 1968 diseñó lo que denominaría Dynabook, un dispositivo curiosamente parecido a las tablets (Ver capítulo 7) empleadas en la actualidad. En 1972 Alan publicó su artículo más conocido e importante, en el que desde entonces ha basado todas sus ideas y visiones:

A Personal Computer for Children of All Ages.

El autor destaca al comienzo del texto, en el resumen, que el artículo especula sobre la aparición de un manipulador de información personal y portable, y sus efectos si este fuese empleado por niños y adultos. Alan afirma que el texto debe leerse como si se tratase de un texto de ciencia-ficción, aunque vaticina que las tendencias del momento garantizan que en un futuro cercano el dispositivo será desarrollado (Kay, 1972).

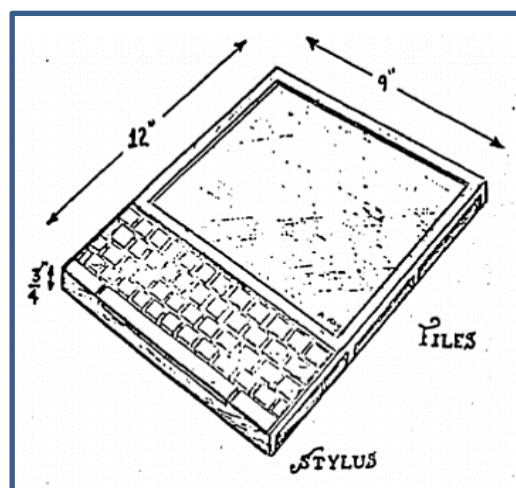


Fig. 28 Dispositivo tal y como aparece diseñado en el artículo de Alan Kay. ©Alan Kay / History Computer.

En el texto muestra su deseo de conseguir un ordenador personal que cumpliese con diferentes objetivos, y marcó las pautas de lo que era necesario en un dispositivo para ser realmente útil. Entre estas se destacan: la necesidad de que permitiese manejar virtualmente todas las necesidades relacionadas con información que el usuario así precisase, permitir la programación y resolución de problemas, poder emplearlo como una memoria interactiva, constituir un editor de textos y servir como medio para dibujar, pintar, animar dibujos, componer y generar música. Expresaba también su deseo de que el equipo fuese pequeño, portable, con pantalla de alta calidad y que funcionase como un medio de comunicación general. A pesar de no conseguir todos sus objetivos, diseñó el lenguaje de

programación Smalltalk, en el cual se han inspirado otros muchos lenguajes, como por ejemplo Java (Lazalde, 2011).

El Dynabook nunca se construyó, puesto que sus tecnologías estaban adelantadas a las existentes en los años sesenta y setenta. Sin embargo, Kay y su grupo continuaron desarrollando el concepto y el primer prototipo fue construido casi 20 años después de haberse creado el concepto, inspirando así tanto al desarrollo de los primeros ejemplos de ordenadores personales y portátiles de escritorio, interfaces gráficas de usuario y multimedia y los actuales ordenadores portátiles (History Computer, s.f. a).

El dispositivo no fue nunca comercializado, pero en Japón en 2002 se llevó a cabo una investigación por medio de la cual se fabricó el dispositivo, el propio Alan Key lo muestra en un documental (Children's Technology Review, 2009).

No puede dejar de mencionarse al Dr. Patrick Hanratty, quien desarrolló el primer software disponible comercialmente para el DA, y fue utilizado como base para casi una

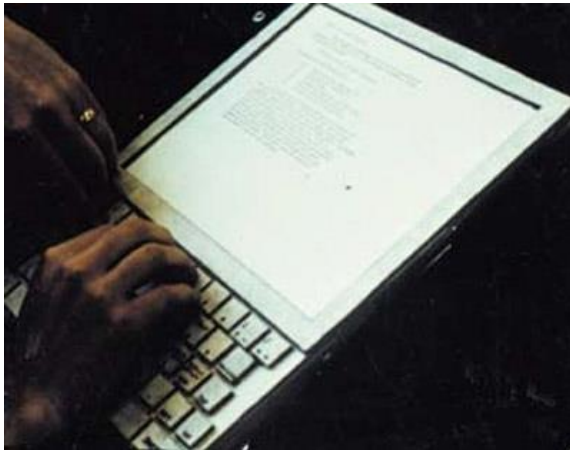


Fig. 29 Prototipo del Dynabook de Alan Key.
©History Computer.

docena de compañías que vendían estos programas. Hoy en día, se estima que el 90% de los softwares DA tienen sus orígenes en este programa (American Machinist, 1998), PRONTO, que constituye el primer lenguaje de programación comercial de CNC²⁷ (DigitalOcean, 2016). Ese estándar fue aceptado por la American Banking Association y aún está en uso hoy en día (American Machinist, 1998).

Durante los años 70 este tipo de software dejó de relegarse al ámbito de la investigación para alcanzar su uso comercial. Aunque el software fue desarrollado por grupos internos de grandes fabricantes de automoción y aeroespaciales fue finalmente la empresa francesa de aviación Dassault la que desarrolló el primer programa DA/FA para la definición y realización de aviones por ordenador, que fue denominado DRAPO (Castor,

²⁷ En el siguiente capítulo se verán desarrollas en detalle las CNC (Control Numérico por Computadora) cuyos orígenes se remontan a 1946.

s.f.). De este modo, a principios de los setenta, numerosas compañías comenzaron a ofrecer sistemas de diseño y dibujo automatizado y podían encontrarse ya algunas capacidades 3D en determinados programas (Baldasano et al., s.f.).

Estos programas de DA, diseñados para operar en grandes y especializados ordenadores, a menudo requerían pantallas de alta resolución caras, llegando a costar todo el paquete de equipo más de 100,000\$. Además, estos programas eran generalmente engorrosos de usar y la formación del operador requería un tiempo considerable. Ya en los años 80, los ordenadores personales IBM y el Macintosh de Apple se hicieron muy populares y algunas empresas empezaron a llevar la tecnología DA al precio del mercado informático (Eiteljorg, 1988).

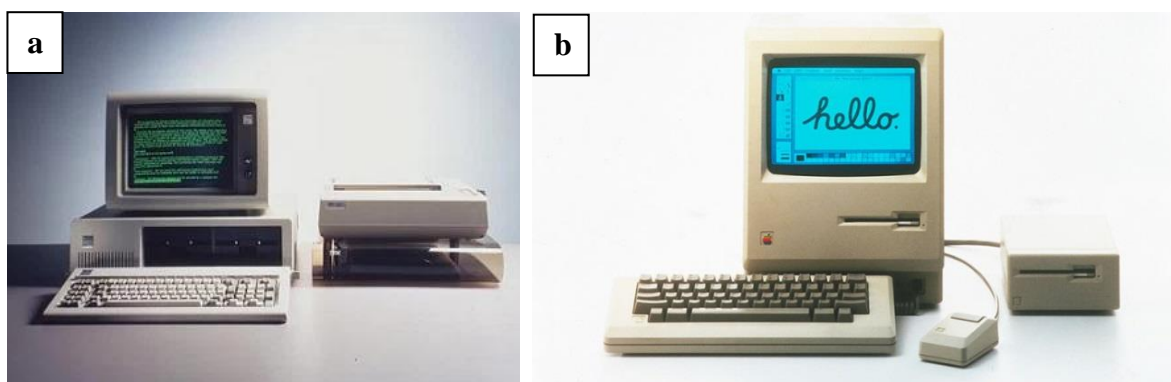


Fig. 30 a) Ordenador IBM 5150, lanzado a la venta el 12 de agosto de 1981, el cual marcó un punto de inflexión en la fabricación de computadores. ©Velasco; b) Apple Macintosh, presentado el 24 de enero de 1984 por Steve Jobs. Este rápidamente se convirtió en el primer ordenador personal con interfaz gráfica de usuario en venderse con éxito al público a pesar de costar 2.495 dólares, entonces precio desorbitado. ©Manuel Ángel Méndez.

A lo largo de la década, el empleo del DA/FA se generalizó en empresas industriales gracias al avance de los ordenadores, convirtiéndose en una dura competencia entre diferentes firmas comerciales (Castor, s.f.). Autodesk, por ejemplo, con el objetivo de crear un programa DA para ordenadores personales, básicamente para desarrollos de ingeniería, llegó a ser el programa de diseño asistido más popular en la década (Baldasano et al., s.f.). Además, la bajada de precios de los sistemas de diseño asistido para ordenadores personales abrió potencial muy grande, pero tenían que ser más fáciles de usar para ampliar su éxito en el mercado, puesto que eran precisas largas sesiones de formación para conseguir operadores especializados (Eiteljorg, 1988).

Ya en los 90, la industria del DA/FA generó un volumen de mercado de miles de millones de euros (Castor, s.f.) puesto que se generalizaron las visualizaciones en 3D y aparecieron muchos programas de DA para una gran variedad de usos y aplicaciones, por lo que se generalizó su uso, aunque aún sería preciso desarrollar mejoras en los programas con el fin de satisfacer las necesidades crecientes de la industria (Baldasano et al., s.f.).

La introducción del DA en las ingenierías españolas no se produjo hasta finales de los años 80, cuando los programas se hicieron más potentes y fáciles de manejar y los precios de ordenadores y programas DA se hicieron accesibles. Fue entonces cuando las mesas de dibujo se sustituyeron rápidamente por las pantallas de ordenador (Baldasano et al., s.f.).

Actualmente, la obtención de objetos tridimensionales constituye un papel fundamental en muchos sectores científicos y es vital para las industrias que producen bienes específicos (Rechina, 1980, p.437).

2. 1. 1 Conceptos básicos del DA

Antes de pasar a desarrollar el modelado 3D tal y como se realiza actualmente, es preciso desglosar conceptos básicos del DA. Esta información puede extraerse de guías de usuario de diferentes aplicaciones de diseño asistido, en las cuales puede hallarse una gran cantidad de información.

Se toma, en este punto, como referencia la guía de la aplicación QCad, aplicación para dibujo asistido por ordenador en dos dimensiones, con la cual es posible crear dibujos técnicos como planos para edificios, interiores, piezas mecánicas o esquemas (Ribbonssoft, s.f.). A nivel de usuario se especifican muy claramente los conceptos básicos del diseño asistido; de este modo se definen diferentes elementos que son comunes e imprescindibles en cualquier sistema DA:

- Las entidades son objetos gráficos en un sistema DA. Generalmente son puntos, líneas, arcos, circunferencias y elipses, aunque también pueden encontrarse otras más complejas y específicas que incluyen polilíneas, textos, acotados, sombreados

y útiles para el trazado de curvas. Todas las entidades constan de una serie de atributos tales como su color, tipo de línea y ancho de línea (Ribbonssoft, s.f.).

- Los bloques constituyen un grupo de entidades que se pueden insertar en el mismo dibujo varias veces en distintos lugares, con diferentes atributos, factores de escala y ángulos de rotación. En esos casos, los bloques son llamados inserciones que una vez creadas, siguen dependiendo del bloque del que proceden. La potencia de las inserciones está en que se puede modificar un bloque y en consecuencia todas las inserciones que se hicieron a partir del mismo se actualizarán reflejando los cambios (Ribbonssoft, s.f.).
- Las capas son superposiciones transparentes, empleadas en dibujos complejos. Se superponen encima de otro dibujo que constituye el dibujo base, el cual no es transparente. La superposición modifica el dibujo base de modo que un nuevo efecto es generado gracias a la combinación de la representación original con el dibujo de la superposición. Este sistema fue muy empleado en obra arquitectónica durante años: el dibujo base constituía la estructura básica de un edificio y sobre capas transparentes se dibujaban los diagramas de electricidad, fontanería, calefacción, aire acondicionado y otros subsistemas. El dibujo base y las hojas transparentes debían ser alineados para que las representaciones coincidiesen (Eiteljorg, 1988).
- Los programas de DA emplean la idea básica de la superposición, y cada parte del dibujo es accesible independientemente y constituye una capa, no una superposición. Cada capa contiene cualquier parte del dibujo que le haya sido asignada por parte del operador y el dibujo puede dividirse en tantas partes como el operador desee (Eiteljorg, 1988). Cada una de las entidades de un dibujo se sitúa sobre una capa y cada una de éstas puede contener cualquier número de entidades. Generalmente todas las entidades con una función o con atributos comunes son dibujadas sobre la misma capa. Cada capa tiene sus atributos y las entidades de una capa suelen heredar los atributos de la misma sobre la que se situó. De este modo, el empleo de capas para organizar y estructurar un dibujo es un concepto básico en el diseño asistido (Ribbonssoft, s.f.). El operador además puede seleccionar cualquier combinación de capas para su visualización en cualquier momento, compartiendo todas ellas escala y punto de vista (Eiteljorg, 1988).

- Píxeles y vectores. Todo aquello que se muestra en un monitor de ordenador, tanto texto como gráficos, es simplemente una serie de puntos, blancos, negros o de color que se denominan píxeles. Éstos se combinan para crear una imagen cuya calidad

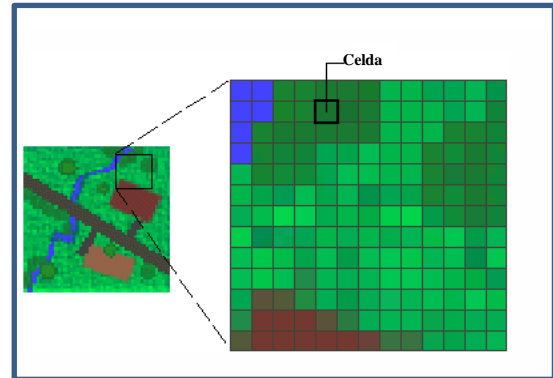


Fig. 31 Imagen que muestra la matriz formada por celdas o píxeles. ©Arc GIS.

depende directamente de la del monitor y de los gráficos del hardware y del software. A pesar de que los gráficos de ordenador son siempre píxeles organizados, las imágenes se crean y almacenan de dos formas muy diferentes. Por una parte, existen programas de dibujo que crean una especie de mapa de la pantalla del ordenador en el que a cada píxel se le asigna una cantidad de datos que indican su color. Estos programas permiten al usuario dibujar de un modo muy sencillo y rápido con un ratón o lápiz; sin embargo, el dibujo se basa en los píxeles individuales, por lo que debe editarse modificando los píxeles individualmente con lo que los dibujos son modificados con dificultad. Las imágenes obtenidas se denominarán imágenes ráster (Eiteljorg, 1988). En su forma más simple, un ráster consta de una matriz de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas (o una cuadrícula) en la que cada celda contiene un valor que representa información, como la temperatura. Los rásteres son fotografías aéreas digitales, imágenes de satélite, imágenes digitales o incluso mapas escaneados. Las principales ventajas de almacenar los datos en forma de ráster son: su estructura de datos sencilla, el formato potente para realizar un análisis espacial y estadístico avanzado, la capacidad de representar superficies continuas y llevar a cabo un análisis de superficie, la capacidad de almacenar puntos, líneas, polígonos y superficies de manera uniforme y la de llevar a cabo superposiciones rápidas con datasets complejos. En los datasets ráster, cada celda, conocida como píxel, posee un valor (Arc Gis, s.f.). Por otra parte, en los sistemas DA los dibujos se crean y almacenan como grupos de entidades, líneas, círculos, arcos, etc. con puntos de inicio relativos a una cuadrícula definida por el usuario independiente de la pantalla, orientación y longitud. Dichas líneas se denominan vectores que no dependen de ubicaciones de píxeles. Estos programas operan más lentamente porque, para que los dibujos se

muestren, el programa debe traducir desde la cuadrícula del dibujo a la cuadrícula de la pantalla. Sin embargo, la edición de los dibujos es mucho más sencilla, porque los objetos en el dibujo pueden ser manipulados como objetos, que pueden ser de tamaño casi ilimitado y ser escalados. Las imágenes de estos programas están basadas en vectores (Eiteljorg, 1988). Algunos de los restos del edificio y otros materiales alrededor de la entrada a *La Acrópolis* de Atenas fueron dibujados en los años 80 con un sistema DA. Tal y como se ha indicado, la diferenciación de materiales en diferentes capas puede a menudo proporcionar una ayuda importante a los investigadores (Eiteljorg, 1988).

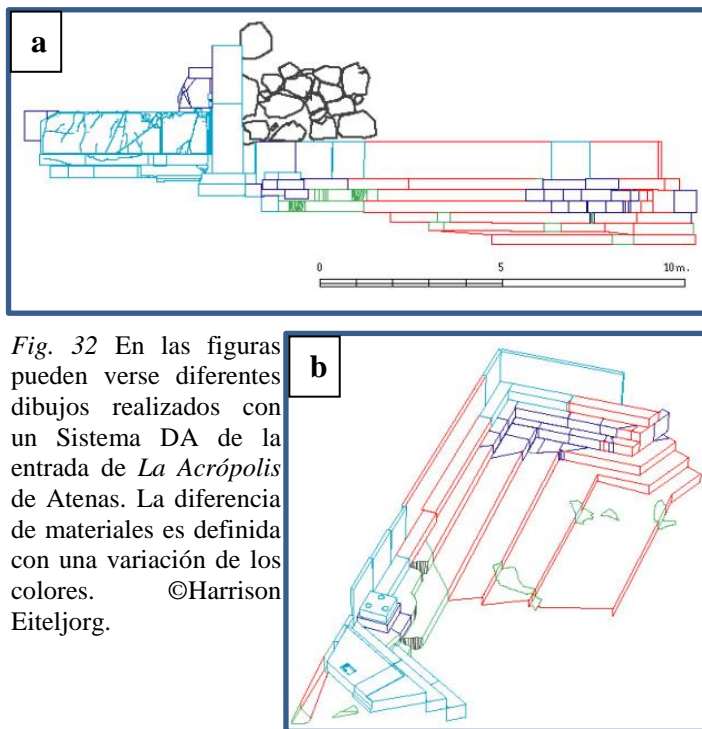


Fig. 32 En las figuras pueden verse diferentes dibujos realizados con un Sistema DA de la entrada de *La Acrópolis* de Atenas. La diferencia de materiales es definida con una variación de los colores. ©Harrison Eiteljorg.

2. 1. 2 Dibujar en DA

Un dibujo en DA es comparable al dibujo tradicional en numerosos sentidos. Si bien cuando se dibuja el alzado o la vista de un objeto en un papel, se utilizan herramientas, por ejemplo, una regla para dibujar líneas, en los sistemas DA se ofrecen también muchas herramientas para

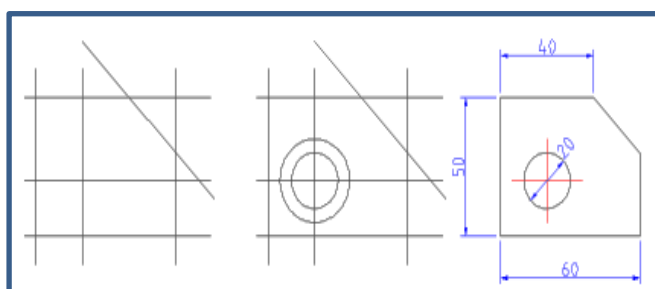


Fig. 33 Tres pasos posibles para crear rápidamente un dibujo utilizando construcciones. ©Ribbonssoft.

lograr el mismo objetivo. La gran ventaja de un sistema DA está en el hecho de que es posible cambiar fácilmente cada entidad del dibujo después de ser creada. Al dibujar con un sistema DA, es muy usual crear líneas que no estarán en la impresión final o que no tienen la longitud correcta y deberán ser recortadas más tarde, por lo que no se debe dudar en crear un auxiliar de la construcción si ello ayuda a definir o verificar una parte del dibujo (Ribbonssoft, s.f.).

2. 1. 2. 1 Sistema de coordenadas

Una correcta comprensión y manejo del sistema de coordenadas es fundamental para trabajar con cualquier programa DA, puesto que es habitual su empleo. Los elementos fundamentales del sistema de coordenadas son (Ribbonssoft, s.f.):

- El origen de un dibujo es el punto donde los ejes X e Y se cortan. Es además el punto cero absoluto del dibujo. Además del punto cero absoluto, también hay un punto cero relativo en QCad. Este último puede ser situado en cualquier lugar como una referencia temporal de una construcción local.

- Las coordenadas cartesianas es el sistema estándar que se utiliza por defecto. En este sistema, la posición de un punto se describe por su distancia a los ejes X e Y. Estas coordenadas son escritas generalmente con el siguiente formato: ordenada-x, ordenada-y. También pueden ser referenciadas desde una posición distinta a la del origen. En este caso hablamos de "coordenadas relativas".

- Las coordenadas polares utilizan una distancia y un ángulo para describir la posición de un punto. El ángulo 0 apunta siempre a la derecha de la pantalla (al este). Del mismo modo que las coordenadas cartesianas, las polares pueden referenciarse a un punto diferente del origen.

2. 1. 2. 2 Edición básica

A continuación, se describe una introducción a la edición básica de un sistema CAD. Este proceso implica diversas fases (Ribbonssoft, s.f.):

- Construcción de una entidad. Las entidades pueden ser añadidas al dibujo mediante su duplicado o a través del empleo de diversas herramientas. Para dibujar una entidad es preciso definir todos los puntos y parámetros que definen dicha entidad.

- Seleccionar una entidad es una de las operaciones más básicas de CAD, puesto que es imprescindible si se desea suprimirla, duplicarla o transformarla. Sin embargo, la selección correcta de las entidades no es siempre una operación trivial, puesto que, sin desearlo, pueden ser seleccionadas varias al mismo tiempo. Determinados programas ofrecen una amplia variedad de herramientas de selección para seleccionar rápidamente grupos de entidades, entidades dentro de un intervalo, entidades relacionadas, etc...

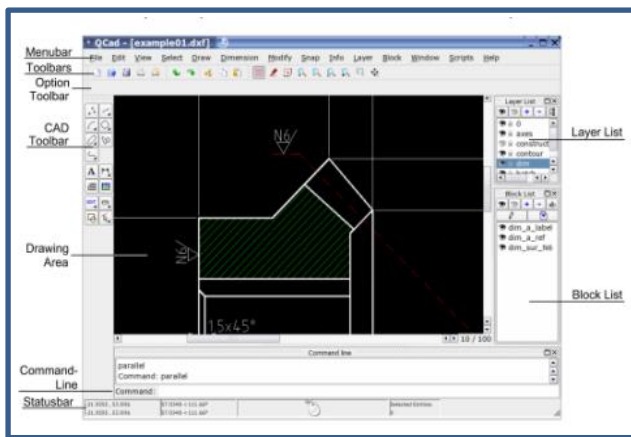


Fig. 34 Ventana principal de la aplicación de Qcad®. ©Ribbonssoft.

- Modificaciones. Las entidades existentes pueden ser modificadas de muchas maneras. Las modificaciones básicas que no alteran la característica de la geometría de la entidad afectada incluyen la traslación, la rotación, la reflexión y el escalado. Otras producen otros cambios como recortar, ampliar o alargar la entidad.

2. 1. 2. 3 Visualización en DA

En los sistemas DA no existe una escala de dibujo, puesto que todos los tamaños y las distancias se especifican mediante su propia escala de valores. Sólo en la fase de impresión se deberá especificar la escala apropiada. En la pantalla, el usuario puede ampliar el zoom para ver más detalles del dibujo o reducirlo para ver una perspectiva más amplia (Ribbonssoft, s.f.).

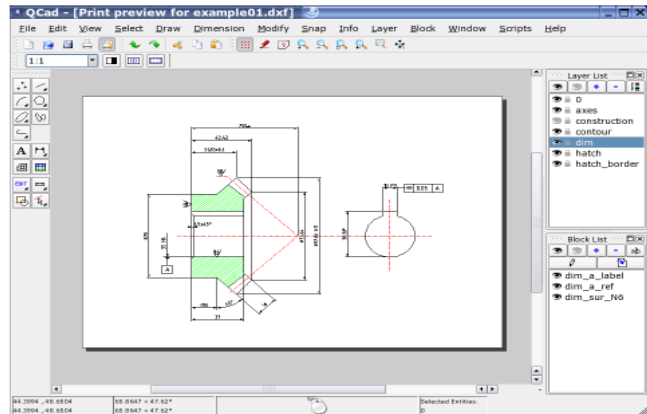


Fig. 35 Print Preview, vista previa de impresión. ©Ribbonssoft.

2. 1. 2. 4 DA y modelado de sólidos 3D

El DA se utiliza ampliamente también para modelar sólidos puesto que se emplea en una gran cantidad de softwares. Los modelos sólidos se emplean en numerosas industrias, desempeñando un papel fundamental en las de manufactura en la que modelos de piezas y ensamblajes se modelan empleando un software de modelado sólido o bien sistemas de diseño asistido.

Para diseñar modelos sólidos en estos programas, los usuarios pueden bien especificar puntos, curvas y superficies, y unirlos

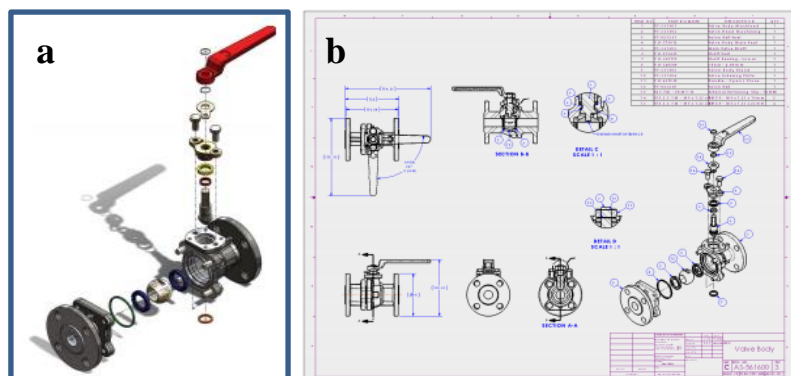


Fig. 36 Los softwares de DA 3D de Solidworks Corp. presentan numerosas aplicaciones en el campo industrial y del diseño de piezas, tal y como puede verse en la imagen, al permitir explorar a fondo un ensamblaje y crear automáticamente las vistas del dibujo 2D a partir del modelo 3D, que se va actualizando a medida que se realizan modificaciones. ©Solidworks Corp.

posteriormente con el fin de definir los límites del objeto, bien seleccionar modelos de formas simples, tales como bloques o cilindros, o bien especificar sus dimensiones, posición y orientación, y combinarlos uniéndolos mediante diferentes operaciones. El resultado es una representación digital completa y detallada de la geometría de un objeto o de un conjunto de objetos que aparecen en forma de imágenes fáciles de entender. Los programas ofrecen, además, eficientes soluciones para seleccionar o editar las características del modelo que se está diseñando, así como una respuesta inmediata que ayuda a realizar las modificaciones (Rossignac & Requicha, s.f., p.1).

Sin embargo, antes de Dassault Systèmes SOLIDWORKS Corp., la industria carecía de un software que combinase el modelado de sólidos en 3D con la sencillez de uso de un programa de PC. En 1993, su fundador contrató un equipo de ingenieros con la misión explícita de hacer que la tecnología DA 3D fuera más accesible. Lo lograron creando la primera tecnología DA 3D capaz de ejecutarse en una plataforma

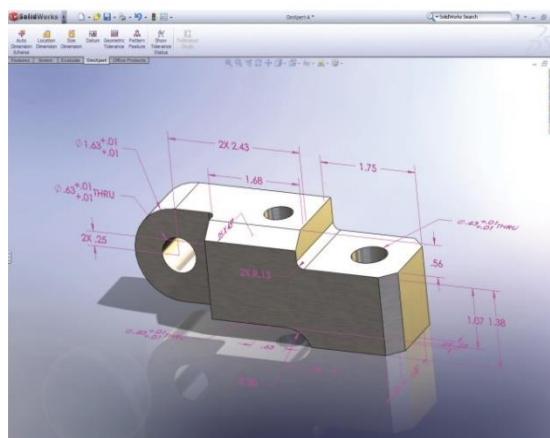


Fig. 37 Modelo 3D sólido que muestra todas las medidas de la pieza. ©Solidworks.

Windows sin necesitar sistemas caros de hardware y software para funcionar. En 1995 se lanzó la primera versión del software SOLIDWORKS. En solo dos meses, la versión era vitoreada por su facilidad de uso, ya que permitía a más ingenieros que nunca aprovechar las ventajas del DA 3D para darles vida a sus diseños (Solidworks, s.f. b). La empresa explica hoy cómo el modelado sólido 3D aceleró el diseño de objetos y sus detalles, por lo que se ahorra tiempo y costos de desarrollo, aumentándose la productividad y mejorando la visualización y comunicación. El modelado sólido 3D proporciona la base para el diseño, la simulación y la fabricación de cualquier pieza y su ensamblaje a través de una amplia gama de industrias, aplicaciones y productos (Solidworks, s.f. a).

Tal y como se desarrolla más adelante, una vez construido el modelo es posible generar una multitud de puntos de vista con diferentes perspectivas, añadir iluminación, sombras y reflejos (Reilly & Shennant, 1989, p.159). Así, la variedad y usos de sistemas que incorporan representaciones de sólidos está creciendo rápidamente y cada vez son más

empleados en ingeniería mecánica y civil, arquitectura y básicamente en todos aquellos campos que tratan con fenómenos espaciales (Requicha, 1980, p.437).

Estos sistemas no deben ser confundidos con otros sistemas gráficos que producen imágenes de objetos que parecen ser sólidos. Para esclarecer este punto, se pone de ejemplo la construcción de un modelo conocido como *face-model* a partir de un conjunto de paneles poligonales renderizados. El objeto aparentemente es sólido, sin embargo, este no ha sido construido como un objeto cerrado tal y como ocurre en los que han sido obtenidos mediante técnicas de modelado de sólidos (Reilly & Shennant, 1989, p.158). En ambos la apariencia del mismo es totalmente sólida a pesar de que en la realidad la malla del facemodel no es sólida en su interior, de modo que el peso del archivo no aumenta de peso, lo que en numerosos casos es innecesario e incluso contraproductivo.



A	 v2.78 Verts:8 Faces:6 Tris:12 Objects:1/3
B	 v2.78 Verts:658,376 Faces:692,252 Tris:1,299,293 Objects:1/41

Fig. 381 Información extraída del programa Blender referente a datos que aparecen siempre en la barra localizada en la parte superior. En la barra A) se indican los vértices, caras y triángulos que aparecen al iniciar el programa en su configuración predeterminada, es decir con un cubo, además de la lámpara y de la cámara, motivo por el cual indica que hay 3 objetos. Por su parte, en la barra B) aparece la información referente a un proyecto en el que hay una gran cantidad de objetos, 41 para ser exactos, con sus vértices, caras y triángulos. Puede apreciarse claramente la enorme diferencia entre los valores de una barra y de la otra. ©María Ávila Rodríguez.

Así, dado el carácter de pieza sólida que presentan los modelos generados con estas técnicas, su uso en patrimonio es muy poco frecuente puesto que los elementos sólidos pesan más y esta cualidad generalmente es innecesaria en los modelos patrimoniales. Sin embargo, en el mundo industrial la técnica es muy empleada por las grandes ventajas que presenta a la hora de trabajar con diseño de piezas, constituyendo un aspecto fundamental para el desarrollo de productos modernos y ser la base para el diseño, la simulación y la fabricación de cualquier pieza y ensamblaje de una amplia gama de sectores, aplicaciones y productos.

2. 2 Proceso del modelado 3D

Modelar en 3D objetos, monumentos y/o escenas, constituye cada vez una actividad más habitual y comienza a ser una herramienta indispensable para las numerosas aplicaciones que serán descritas a lo largo de la presente tesis doctoral.

El modelado de formas orgánicas, cuya geometría es altamente irregular y que probablemente presentarán relieve o diversas texturas (Patrimonio Virtual, 2015), es muy común en el ámbito de la documentación, la conservación y la restauración patrimonial.

2. 2. 1 Conceptos básicos del modelado

Es fundamental comprender como funcionan los programas de modelado 3D y los elementos que lo componen a fin de entender también su utilidad en el ámbito de la conservación del patrimonio cultural.

Se establecen los siguientes elementos:

- **La escena o escenario.** Es la interfaz que contiene toda la información necesaria para identificar y posicionar los modelos y el resto de elementos que serán desarrollados más adelante, así como los comandos que contribuirán a llevar a cabo tantas operaciones como el programa permita. Dependiendo del programa, la interfaz será más o menos intuitiva. A su vez, en la escena aparecerán diferentes elementos: el modelo o modelos 3D, la cámara, el foco de iluminación, etc., aunque cada programa incluirá más o menos elementos.
- **El Sistema de coordenadas.** Cuando se modela, el ordenador trabaja con algoritmos geométricos que no manipulan sólidos físicos sino datos que representan estos sólidos (Requicha, 1980, p.439). Estos sólidos se definen con un conjunto de puntos que son a su vez definidos por los valores establecidos mediante las coordenadas espaciales X, Z, Y.

Las coordenadas en 3 dimensiones del espacio constituyen un conjunto de valores que permiten definir la posición de cualquier punto de un espacio geométrico con respecto a un punto denominado origen (Abc, s.f.). Existen dos maneras distintas de trabajar con los ejes de coordenadas, llamadas *right-hand* y *left-hand*. La diferencia entre ambas viene determinada por la dirección dada al eje Z.

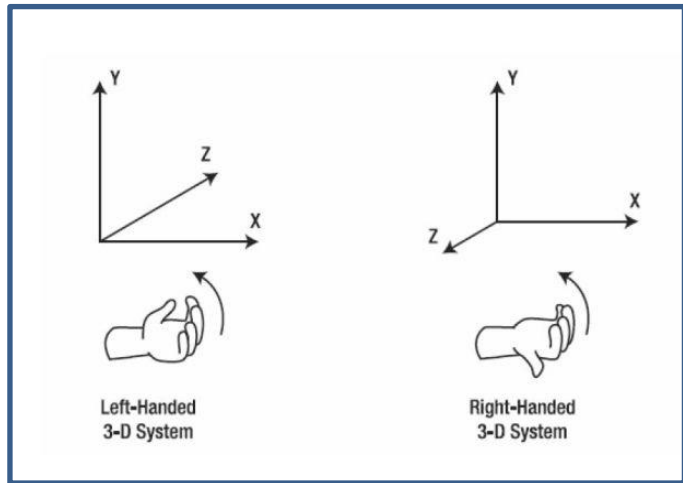


Fig. 39 En la imagen puede verse ilustrado los dos modelos. © Wordpress.

En el primer modo, el eje Z toma valores más altos, positivos, conforme el usuario se aleja de la pantalla, mientras que para el modo left-hand ocurre al contrario (Aprendiendo Xna, s.f.).

El sistema suele conocerse como sistema de coordenadas universal. Sin embargo, al trabajar en la escena, pueden emplearse diferentes sistemas de coordenadas, siendo muy empleado el sistema de coordenadas local del mismo objeto o el sistema de coordenadas de la vista. Al realizar operaciones en la escena, esta se realiza con respecto al sistema de coordenadas escogido por el usuario. Al escogerse el sistema de coordenadas de la vista, los ejes de coordenadas se intercambian en función de la vista escogida: top, front, left y perspective (Abc, s.f.), numerosos programas incluyen también la vista camera, right, bottom, etc.

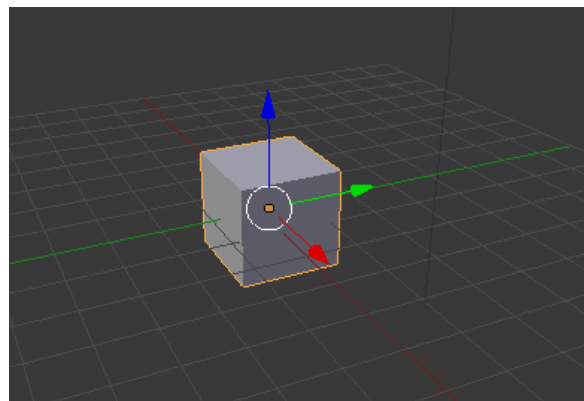


Fig. 40 La imagen muestra el sistema de coordenadas local del objeto en azul, rojo y verde. En este caso el cubo está siendo visualizado en el programa Blender, y pueden verse las 3 coordenadas, cada una de un color. ©María Ávila Rodríguez.

De este modo, para explicar la composición de un modelo 3D de forma sencilla puede decirse que cada uno de ellos está compuesto por una serie de puntos situados en el espacio denominados vértices que se conectan para formar aristas. Estos combinados dan lugar a los triángulos quienes, a su vez, unidos, dan origen a las diferentes caras del objeto. El conjunto que forman todos estos elementos reunidos se denomina malla²⁸.

Toda la información correspondiente a los colores, dibujos, detalles, y básicamente cualquier tipo de información gráfica aplicada sobre el modelo se denomina textura.

En modelado 3D hay que diferenciar entre el material y la textura. Por un lado, el material determinará las propiedades visuales del objeto. De él dependerá que un objeto sea opaco, translúcido, transparente, tenga mucho o poco brillo, etc. Por otro lado, está la textura que determinará el color del objeto. La textura puede ser un color liso o una imagen entre otras. Realmente, en numerosos softwares la textura queda englobada dentro del material (Aparicio, 2017a). Más adelante se desarrollará tanto el proceso de texturizado como el de renderizado.

- **Tipos de modelos 3D.** Existen modelos representados por polígonos y aquellos definidos por sus curvas matemáticas.

Uno de los sistemas utilizado por el ordenador para representar cualquier estructura son los polígonos, por ejemplo, un cubo tiene 6 caras poligonales cuadradas. Sin embargo, incluso una esfera o cualquier forma redondeada también está representada mediante polígonos.

Actualmente existen sistemas de modelado donde el usuario no trabaja con polígonos, sino con superficies curvas definidas matemáticamente. Los modelos definidos por sus curvas matemáticas son conocidos como NURBS y Patch.

²⁸ Es común en los programas de modelado encontrar todo este vocabulario en inglés. Comenzando por la forma más simple, vertexes, pasando por los edges, triangles, faces y finalizando con mesh.

2. 3 Operaciones y herramientas

A continuación, se abordarán las operaciones y las herramientas empleadas habitualmente en modelado 3D aplicado a la conservación del patrimonio.

2. 3. 1 Creación y edición de los modelos

Dependiendo del programa empleado, la creación de formas será más o menos sencilla, así como su modificación. Normalmente, los programas incluyen un número determinado de formas, muchas de ellas planas: círculos, cuadrados, triángulos, o en volumen 3D: esferas, cubos, pirámides, etc. También es posible para muchos programas generar planos o curvas, que pueden ser imprescindibles según la aplicación a la que vaya a ir destinada el modelo. La cantidad de formas, así como las numerosas opciones que ofrecen actualmente los programas de modelado 3D posibilitan un sinfín de modificaciones a la hora de modelar.

A partir de cualquiera de las formas creadas se pueden seleccionar los ejes, vértices o caras para eliminarlos, modificarlos, dividirlos, multiplicarlos, ampliarlos o reducirlos entre tantas otras operaciones, con el fin de conseguir modelar las formas y figuras deseadas.

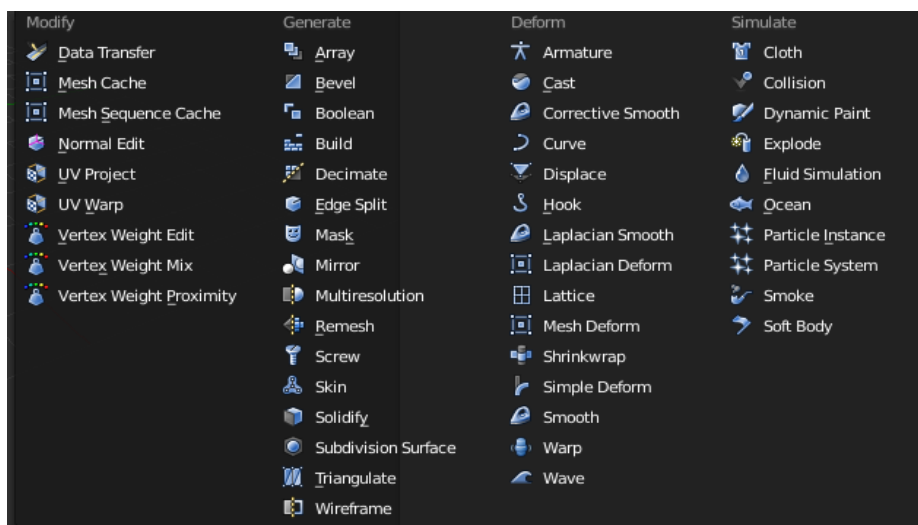


Fig. 41 En el cuadro aparecen los comandos que el programa Blender brinda con todas las modificaciones que es posible realizar en el objeto seleccionado. ©María Ávila Rodríguez.

Además, el objeto entero puede ser seleccionado y modificado. Este proceso se realiza gracias a diferentes herramientas y modificadores que el programa incluirá, siendo numerosos los modificadores que pueden emplearse en el proceso de modelado.

Todas estas opciones suelen permitir la elección del ángulo en el que se va a producir la modificación, así como la dirección y el eje, X, Y o Z en el que se realizará la operación.

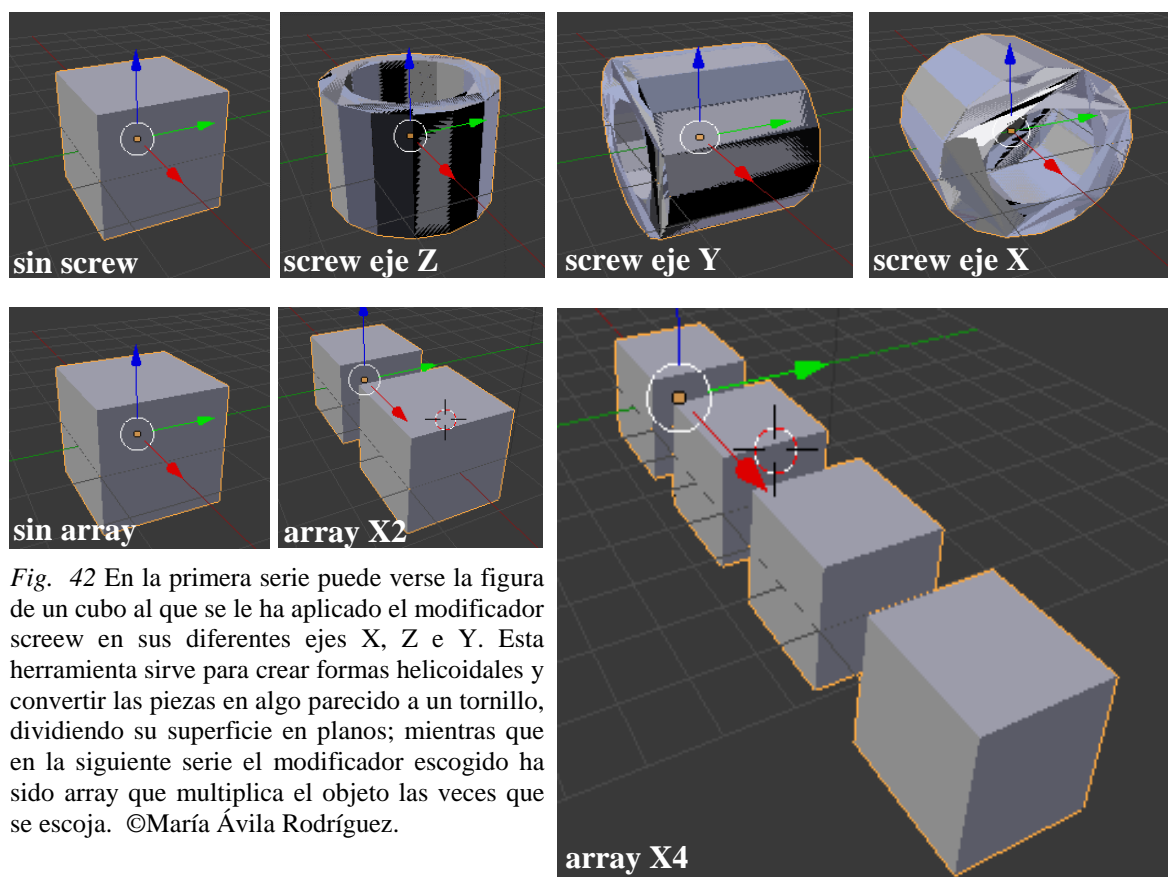


Fig. 42 En la primera serie puede verse la figura de un cubo al que se le ha aplicado el modificador screw en sus diferentes ejes X, Z e Y. Esta herramienta sirve para crear formas helicoidales y convertir las piezas en algo parecido a un tornillo, dividiendo su superficie en planos; mientras que en la siguiente serie el modificador escogido ha sido array que multiplica el objeto las veces que se escoja. ©María Ávila Rodríguez.

Otra herramienta muy empleada es la opción denominada booleanas. Mediante la intersección de diferentes formas se pueden crear objetos de mayor complejidad. Ejemplo de ello son los objetos booleanos, resultantes de combinar dos o más objetos (dependerá de las capacidades del programa empleado), a los que se les ha aplicado una operación booleana. Generalmente es posible aplicar tres tipos de operaciones booleanas: unión, el objeto resultante contiene el volumen de ambos objetos originales, la porción común o superpuesta de la geometría se elimina; intersección, el objeto resultante sólo contiene el volumen común a ambos objetos originales, es decir, el volumen de la intersección; y sustracción, o diferencia, el objeto resultante incluye el volumen de un objeto original, al que se le sustrae el volumen de la intersección (Fernández Ruiz, 2011, p.10).

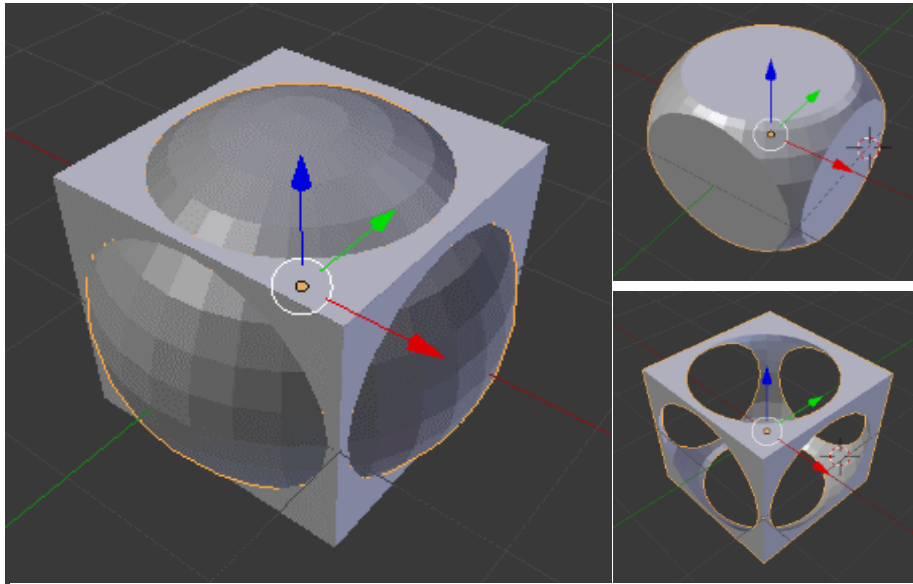


Fig. 43 Para conseguir el resultado buscado con las operaciones de booleanas, es muy común tener que jugar con las 3 opciones existentes: union, intersect y difference hasta alcanzar el objetivo. Para entender las modificaciones que la operación boolean permite, se ha realizado un ejemplo que ilustre la diferencia entre las 3 opciones. A la izquierda aparece un cubo con una esfera introducida dentro del mismo. Cuando se le aplica la operación de booleanas y se selecciona la opción de unión, no se aprecia ninguna modificación puesto que este caso, ambas se unen y permanecen como en el momento de su creación. Sin embargo, en la imagen superior de la derecha puede verse como la esfera se ve cortada por el cubo, mediante la opción de intersect, mientras que, por último, abajo a la derecha, la opción difference deja el hueco de la esfera en el cubo. ©María Ávila Rodríguez.

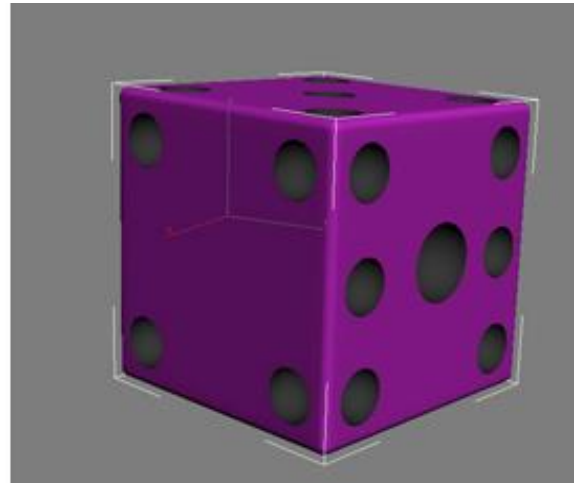


Fig. 44 Creación de un dado a partir de una operación booleanas de sustracción. © Marta Fernández Ruiz.

2. 3. 2 Esculpido 3D

En este punto debe hacerse una aclaración y diferenciación entre el modelado 3D y el esculpido 3D. El modelado se usa comúnmente para construir objetos rígidos, que como se ha visto, pueden ser modificados y editados con un sinnúmero de herramientas y modificadores; sin embargo, el esculpido trabaja esas formas como si fuesen una masa que puede modificarse sin tenerse en cuenta los ángulos ni los vértices. De este modo, en las opciones de los programas de esculpido 3D es posible trabajar virtualmente con los pinceles y herramientas que incluyen.

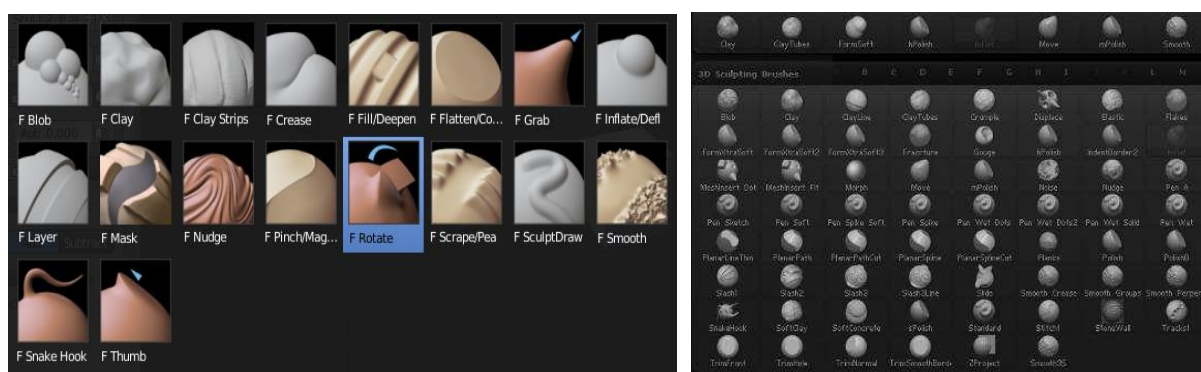


Fig. 2 A la izquierda aparecen las opciones de pincel de esculpido digital del programa Blender y a la derecha del programa Zbrush. ©María Ávila Rodríguez.

El programa más empleado por los artistas digitales es Z-Brush, puesto que las herramientas de trabajo que presenta son muy sencillas de manejar, ya que equivalen a las empleadas en la realidad (Sinapsis, s.f.). Así, el programa trabaja con barro virtual para modelar las figuras. Esta posibilidad constituye para el campo del patrimonio, especialmente para creaciones artísticas y reconstrucciones arqueológicas, un valor a añadir. Una vez las formas básicas han sido creadas, se puede proporcionar detalle al modelo empleando la inmensa variedad de pinceles que el programa incluye o bien mediante otros descargables a través de la web.



Fig. 46 Creación de escultura a base de zspheres, una de las herramientas más empleada para esculpir. ©Marta Ángeles Estalayo.

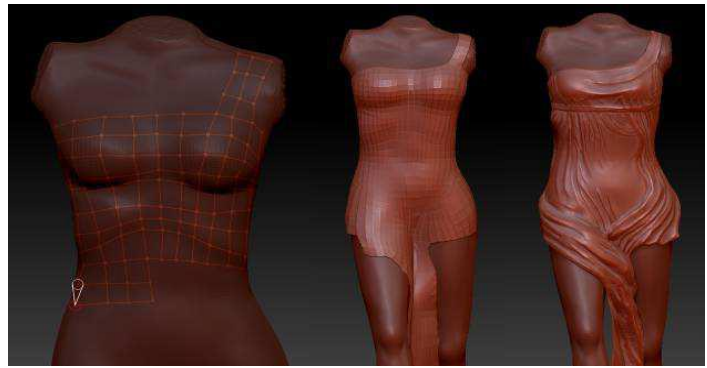
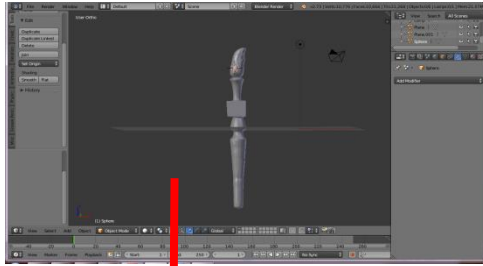


Fig. 47 Ejemplo de esculpido de los detalles de una escultura con la herramienta retopology. ©Marta Ángeles Estalayo.

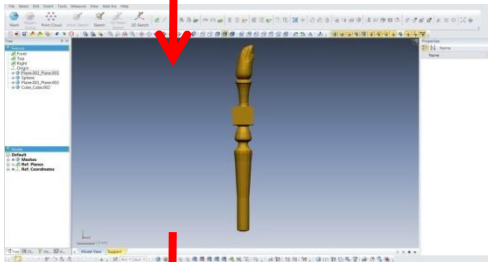
La opción de esculpido suele estar incluida en los softwares de modelado 3D como una herramienta más; sin embargo, hay veces en que el programa empleado para esculpir no presenta las posibilidades ni herramientas que requiere el proyecto sobre el que se está trabajando.

Por ello, es común que, para conseguir mejores resultados, el modelo sea exportado de un programa de modelado a otro, con el fin de facilitar y agilizar el trabajo, y por supuesto, obtener mejores resultados. Sin embargo, esto depende de cada usuario y del proyecto que se esté desarrollando.

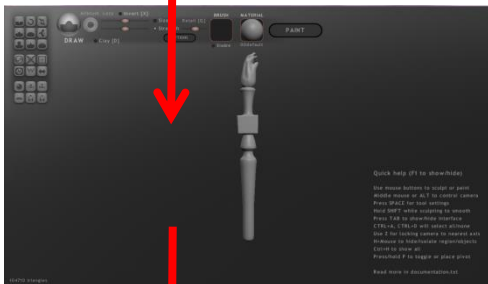
Blender



Geomagic Design X



Sculptris



Blender

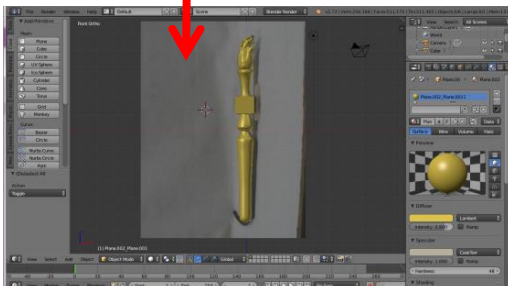


Fig. 48 En las imágenes puede observarse el desarrollo de un proyecto que será descrito en el capítulo 9. Este ejemplo ilustra un caso en el cual el modelado 3D se realiza en Blender, mientras que el esculpido se lleva a cabo en dos programas diferentes, Geomagic Design X y Sculptris, para volver de nuevo al primer programa en el que fue modelado el objeto. ©María Ávila Rodríguez.

2. 3. 3 Importación de imágenes y planimetrías

En patrimonio suele ser común que se precise trabajar con imágenes, ya sean dibujos, fotografías o planimetrías, ampliamente empleados para la elaboración de reconstrucciones y restauraciones. Se dan incluso casos, tal y como se verá en próximos capítulos, en los que el objeto de estudio ha desaparecido y se trabaja virtualmente con su información gráfica existente. Para todos estos casos la importación de imágenes al programa de modelado debe desarrollarse de forma correcta, siendo fundamental trabajar siempre con el máximo rigor científico.

Cuando se importa una imagen, puede ser llevado a cabo el modelado a partir de esta, por lo que los resultados obtenidos van a resultar mucho más exactos que si se trabaja con la imagen abierta en otra ventana y el profesional abre y cierra ventanas durante las operaciones de modelado.

En las intervenciones sobre el patrimonio, suele ser común que los proyectos precisen que las medidas y formas del modelo sean lo más similares posibles a las de los originales, por lo que trabajar con imágenes sobre las que modelar se convierte en

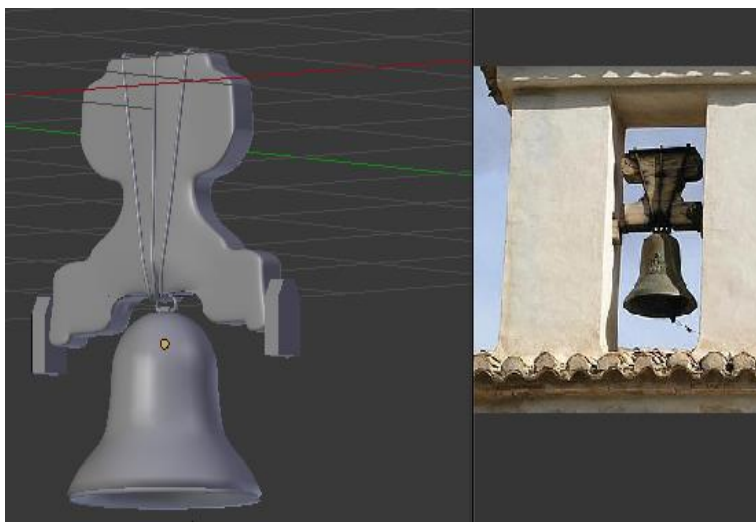


Fig. 3 Objeto modelado a partir de una imagen .jpg importada en Blender. El proceso de modelado se facilita gracias al apoyo de la imagen abierta a la derecha de la pantalla. Ejercicio del curso *Blender para la reconstrucción virtual en 3D del patrimonio (1ª Edición)*, cursado del 1 al 28 de febrero 2017, impartido por Pablo Aparicio Resco ©María Ávila Rodríguez.

imprescindible. Por ejemplo, para realizar levantamientos arquitectónicos, la importación de plantas, alzados y secciones del edificio ha supuesto un gran avance, puesto que se trabaja directamente sobre éstos. En el escritorio pueden cargarse diferentes imágenes, por lo que se van seleccionando las vistas y se van levantando los elementos necesarios para construir el edificio.

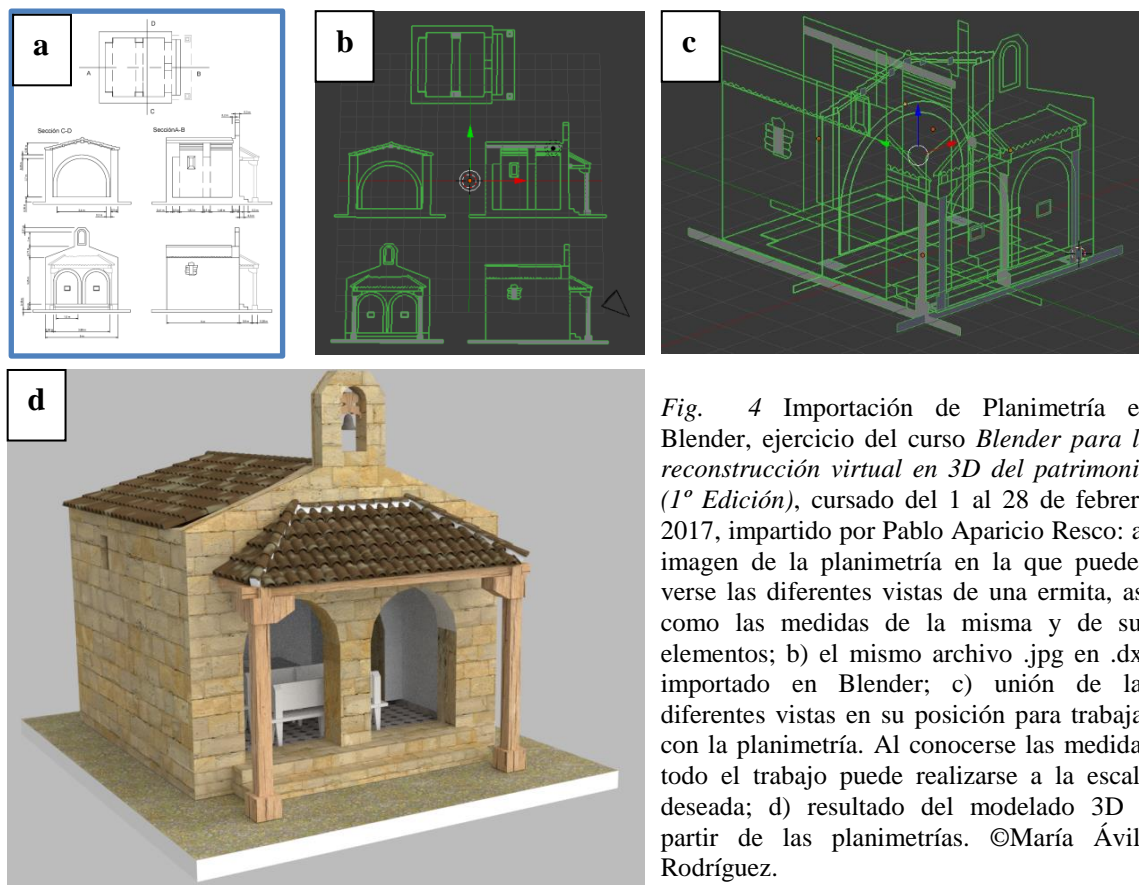


Fig. 4 Importación de Planimetría en Blender, ejercicio del curso *Blender para la reconstrucción virtual en 3D del patrimonio (1ª Edición)*, cursado del 1 al 28 de febrero 2017, impartido por Pablo Aparicio Resco: a) imagen de la planimetría en la que pueden verse las diferentes vistas de una ermita, así como las medidas de la misma y de sus elementos; b) el mismo archivo .jpg en .dxf importado en Blender; c) unión de las diferentes vistas en su posición para trabajar con la planimetría. Al conocerse las medidas todo el trabajo puede realizarse a la escala deseada; d) resultado del modelado 3D a partir de las planimetrías. ©María Ávila Rodríguez.

También es común que en arqueología se presente la necesidad de reconstruir elementos faltantes. Para ello, en algunos casos se dispone de dibujos de objetos que se modelan en 3D, por lo que, si este se modela directamente a partir de la foto, los resultados obtenidos son realmente exactos.

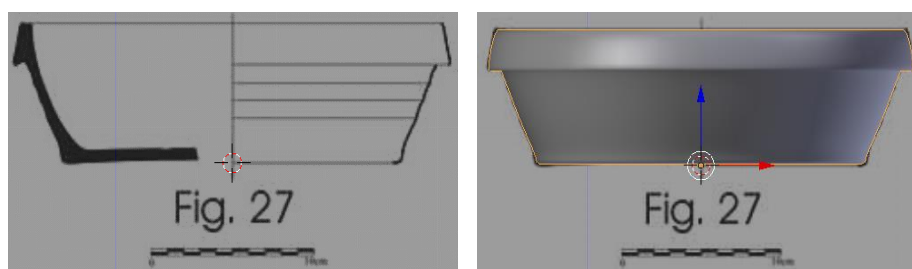


Fig. 51 Levantamiento de una cerámica a partir de una imagen .jpg importada en Blender. En la imagen se muestra la sección y el alzado de la pieza y aparece la escala, por lo que las medidas del objeto son reales. Si este modelo se materializase sus medidas estarían ajustadas a la realidad. Ejercicio del curso *Blender para la reconstrucción virtual en 3D del patrimonio (1ª Edición)*, cursado del 1 al 28 de febrero 2017, impartido por Pablo Aparicio Resco ©María Ávila Rodríguez.

2. 3. 4 Texturizado

Cuando se trabaja con un modelo 3D, el texturizado es uno de los procesos más importantes, y en ocasiones, más complejo.

A modo de introducción, es posible afirmar que el texturizado se basa en la aplicación de una textura establecida en un color y comportamiento del material al que quiere representar, por ejemplo, la refracción. Sin embargo, también puede aplicarse una imagen 2D que imita una textura existente en el mundo real (Espinell, 2016, p.160).

Para entender esto, debe explicarse que las texturas trabajan en base a un plano de sólo dos dimensiones denominado plano cartesiano, utilizando las coordenadas de los ejes X e Y. De este modo, para poder aplicar una textura sobre un modelo 3D es necesario que exista algún mecanismo de comunicación que permita proyectar estos datos (bidimensionales) sobre la malla (tridimensional). Así, para que una textura plana pueda envolver un objeto tridimensional, esta debe “aplanarse” virtualmente para presentar toda su geometría en sólo dos dimensiones, con los valores de “U” para las coordenadas en el eje X, y los de “V”, para las del eje Y. Así el UV Mapping es la manera en la que una textura debe ser desplegada sobre un objeto. El proceso de mapeo UV consiste en asignar píxeles desde las imágenes a la superficie de los polígonos. Este proceso puede realizarse de manera automática, que constituye una opción útil pero limitada, ya que puede generar distorsiones; por ello se han de utilizar las opciones de UV Uwrapping, que básicamente significa desenvolver la geometría, estirándola sobre un plano. Al emplear esta opción, la geometría se presenta simplificada facilitando el proceso de trabajar sobre ella (Ejezeta, 2014). De este modo, puede decirse que el mapeado UV consiste en decirle al software que cree un “mapa” desplegando las caras del objeto sobre una imagen (Aparicio, 2017b).

Generalmente el proceso de texturizado consiste en desplegar este mapa de coordenadas como si fuese la “piel” del modelo para pintar sobre él la textura en Photoshop, es decir en 2D (Santi, 2010).

Es importante tener en cuenta que, para texturizar, se debe contar con la imagen que desee emplearse como textura. Cuando no se tienen archivos de dicha textura, por ejemplo, ladrillos de un edificio, césped o arena para el entorno, los suelos, materiales para objetos como madera, piedra, metal, etc., es posible descargarse en internet imágenes que pueden

emplearse con este fin. En ocasiones, esto puede generar distorsiones, puesto que la textura se irá repitiendo las veces que haga falta hasta cubrir la superficie entera del objeto que se desea texturizar.

De este modo, es muy útil emplear una textura seamless, tileada, evitando el efecto baldosa en el que los encuentros de repeticiones de las texturas son demasiado evidentes. Con Photoshop y otros softwares es posible crear estas imágenes (Soriano, 2014).



Fig. 5 Imagen de un tutorial en el que puede verse como realizar una textura tileada. ©Alejandro Soriano.

Así, una textura tileada es una fotografía que ha sido modificada previamente para que, si se repite en el objeto 3D, no se diferencie dónde empieza y dónde acaba por que sus límites izquierdo y derecho/superior e inferior coinciden (Aparicio, 2017b).

Actualmente existen páginas web donde pueden descargarse estas imágenes gratuitamente, por lo que a no ser que sea imprescindible tilear una determinada imagen, descargar una textura en estas páginas web es sin duda la opción más eficaz, rápida y sencilla. Una página que tiene una enorme cantidad de texturas, es CGTextures. Tras registrarse rápida y gratuitamente, el usuario tiene acceso a una biblioteca online de texturas gratuitas de buena calidad que pueden ser descargadas (Textures.com, s.f.).

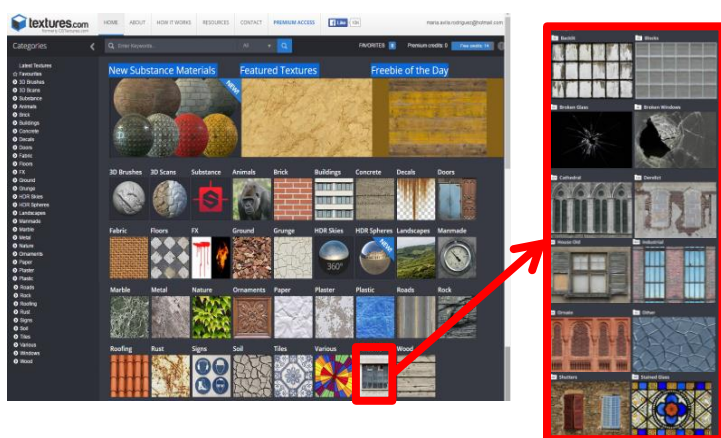


Fig. 53 Página principal de Textures.com, donde puede verse la cantidad de texturas disponibles. En el ejemplo se ha seleccionado la opción “window”, ventana, que a su vez presenta numerosas opciones, cada una de ellas con una gran cantidad de imágenes, en ocasiones, más de 500, siendo las posibilidades de encontrar la textura deseada, realmente altas. Deben escogerse las imágenes donde se indique seamless. ©Textures.com.

2. 3. 5 Renderizado

Renderizar, como ya se ha apuntado, es calcular la representación de una escena teniendo en cuenta la iluminación y el ambiente, así como los objetos que en ella aparecen (Aparicio, 2017a).

Esta fase es realmente importante, dado que en ella se garantiza que el resultado final sea interesante y atractivo (Aparicio, 2017c).

Para obtener buenos resultados, la iluminación es uno de los principales factores a tener en cuenta. Aunque un modelo 3D esté correctamente realizado y texturizado, si la iluminación que se aplica a la escena no es correcta, los resultados no podrán ser apreciados.

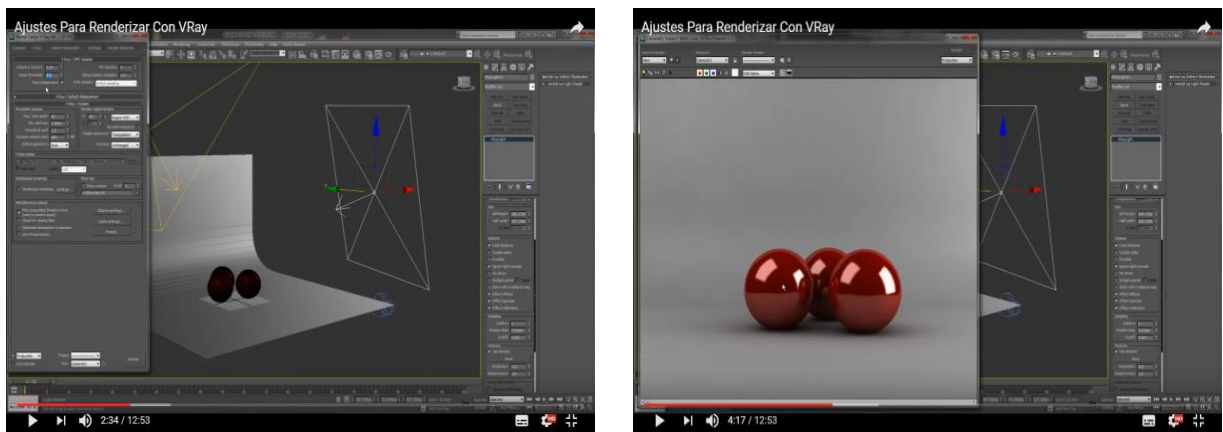


Fig. 54 A la izquierda puede observarse el escenario 3D con luces, la cámara, el modelo y un plano curvo que ha sido añadido como base y fondo con el fin de mejorar los resultados del renderizado. A la derecha puede apreciarse el resultado en la renderización. El programa empleado es Autodesk 3D Max con V-Ray. ©3D Luis Tutorials.

A pesar de ser necesario el control de los aspectos técnicos, una correcta iluminación de la escena se basa en la observación y en la interpretación.

En su *Manual de Iluminación y raytracing con YafaRay* Alvaro Luna Bautista (2012) establece que los objetivos principales de la iluminación en la escena 3D son:

- Dirigir la mirada del espectador hacía aquello que se quiere comunicar a través de la iluminación, la composición de la escena y las propiedades de los elementos que la componen. Una gran parte de la problemática generada en el renderizado surge por la incapacidad de atraer suficientemente la atención del espectador, lo que en numerosas ocasiones ocurre al no emplearse las herramientas adecuadamente.

- Realzar propiedades de los elementos de la escena y la de su historia. Con la iluminación se han de realzar formas, líneas, relieves, reflejos, las diferentes atmósferas, etc; así como resaltarse el carácter de los personajes y la historia de la escena. No tiene sentido crear complejos modelos 3D si la iluminación no es capaz de resaltarlos adecuadamente.
- Contextualizar los elementos, crear perspectiva y profundidad. No solo el modelado y el texturizado crean el efecto tridimensional; la iluminación y las sombras correctamente establecidas ayudan a crear el efecto tridimensional.
- Complementar la composición de los objetos en la escena. La iluminación debe resaltar la composición de los objetos que queremos crear y ayudar en el balance de la escena.

La iluminación en 3D es comparable a la luz experimentada en el mundo real. Para que el ojo vea, es preciso que haya luz que refleje los colores de los objetos. En física la luz es definida como aquella energía consistente en vibraciones electromagnéticas que se propaga, a partir de su origen, en línea recta y con movimiento ondulante. Pues bien, en los programas 3D, cada superficie es vista por la cámara que recibe una cierta cantidad de luz de cada una de las lámparas de la escena, lo que le va a permitir renderizar dichas superficies. Dado que la luz provoca la capacidad de observar los colores, y en consecuencia, todos los objetos se muestran de color negro en su ausencia, también en una escena 3D sin luz el renderizado resultante será completamente negro. La iluminación puede también, por tanto, conseguir realizar detalles de la escena y proporcionar un tono determinado (Fernández Quesada, 2005, p.25; Pedersen, s.f.)

Las luces, dependiendo del programa, brindarán unas opciones u otras. En Blender, por ejemplo, la luz escogida puede ser, entre otras muchas opciones, solar, lámpara, spot, hemi o área, cada una de ellas con sus características y controles, así como ventajas e inconvenientes, puesto que en ocasiones las que mejores resultados van a proporcionar conllevan mayores cálculos y flujo de trabajo, por lo que el renderizado se hace más pesado y lento. Dentro de cada una pueden calcularse factores tales como la fuerza e intensidad con la que se emite, la distancia o el tamaño del foco luminoso... entre otros.

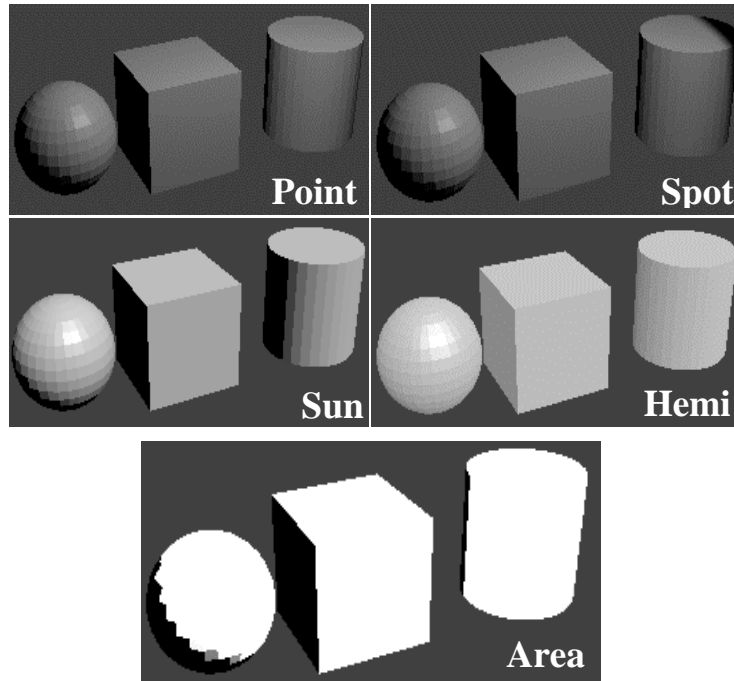


Fig. 55 En la imagen puede observarse tres figuras sencillas creadas con Blender e iluminadas con las opciones que el programa presenta en sus formas predeterminadas, es decir, ni la posición ni ninguno de los valores de las luces han sido alteradas. ©María Ávila Rodríguez.

Por otra parte, debe existir una cámara en la escena para que a la hora de renderizar el modelo y todo aquello que se desee que aparezca en la imagen o video resultante esté debidamente enfocado. Por ello, su posición en la escena debe ser calculada y manejada con precisión puesto que de lo contrario podría no enfocarse el modelo y este jamás aparecería en el renderizado. Cuanto mayor

conocimiento se tenga del manejo de las cámaras, mejores serán los resultados obtenidos; sin embargo, es cierto que no es imprescindible tener conocimientos avanzados para saber manejar las opciones más básicas de la cámara.

Programas como Nuke, Photoshop, After Effects, Gimp etc., constituyen herramientas imprescindibles para la culminación de lo que se conoce como un buen render. Actualmente, los buenos motores de render incluyen la posibilidad de reparar e incluso mejorar determinados aspectos, pero el resultado del renderizado final siempre va a depender del planteamiento y proceso desarrollado (Alaiza, 2015).

Todo software de diseño 3D debe apoyarse, a la hora de mostrar los resultados finales, en un motor de renderizado, es decir motores de representación de los objetos que aparecen en la escena.

Blender cuenta con un motor interno, Blender Internal; sin embargo, desde hace unos años este se ha quedado desfasado y no está siendo desarrollado, al contrario de lo que sucede con el nuevo motor denominado Cycles. Éste último es el más empleado, puesto que sigue la estela de grandes motores de renderizado como V-Ray o Yafaray (Aparicio, 2017a).

V-Ray es un motor de render que se utiliza como una extensión de los mayores programas de edición de gráficas 3D tales como 3Dmax, Cinema, Maya o Sketchup entre otros. Este motor constituye toda una referencia para el procesamiento de escenas que requieren un alto nivel de realidad, puesto que ofrece los recursos necesarios para aplicar a las escenas materiales avanzados y fuentes de iluminación globales: reflexiones y refracciones, soluciones borrosas, materiales con iluminación propia, elementos translúcidos, texturas de dispersión, etc. V-Ray es uno de los motores de render más populares por el potencial que presenta a la hora de calcular la iluminación de las escenas, posibilitando trabajar con iluminación global, luces indirectas, mapas irradiantes o luces cáusticas entre otras fuentes de luz. Por ello, V-Ray está considerado como el motor de render ideal para obtener resultados de muy alta calidad sin tener conocimientos avanzados sobre renderizado de escenas (Shina, S., 2013).

Dos son los fenómenos que pueden recrearse en la post producción con V-Ray: los denominados *bloom* y *glare*, insertados dentro de las utilidades del *Vrayframe* buffer, la ventana de Renderizado.

- El bloom, del inglés florecer, es la forma existente para reproducir la distorsión percibida por el ojo humano o la cámara en la realidad. Constituyen haces de luz que se extienden más allá de los límites de la zona de incandescencia en una imagen, contribuyendo a la sensación de luz intensa que domina la imagen. El efecto debe activarse antes de lanzar el render y el resultado de post producción es interactivo, lo que permite ser graduado tanto como se quiera. Además, existen filtros accesibles en el menú que permiten determinar sobre qué superficies se aplica el efecto, así como filtrar el contenido por ID de material e ID de objeto.
- El Glare. Mientras que el Bloom es una sensación global de resplandor, este otro fenómeno tiene que ver con deslumbramiento que va a depender del ángulo de contacto, de la fuente de luz y del receptor. Es posible enmascarar el resultado y activar o desactivar la difracción de determinadas zonas (Alaiza, 2015).

YafaRay, por su parte, es un raytracer o “trazado de rayos”, es decir, una técnica de representación para generar imágenes realistas mediante el seguimiento de la trayectoria de la luz a través de una escena 3D. Actualmente, el motor YafaRay se puede utilizar en

diferentes aplicaciones, tales como Blender. YafaRay es libre y usa un lenguaje de descripción de escenas en XML (Yafaray s.f.).

El motor ofrece diferentes tipos de luz (Luna, 2012):

- Luz puntual, aquellas definidas por coordenadas de un punto desde el cual se emite la luz, por lo que son poco realistas y generan sombras de bordes “duros”, sin embargo, son bastante prácticas a la hora de iluminar una escena.
- Luz de área, en la que se define un área desde la cual se emite luz y las sombras son siempre suaves y más realistas.
- Otros tipos de luz son la luz sol y la luz de fotones.

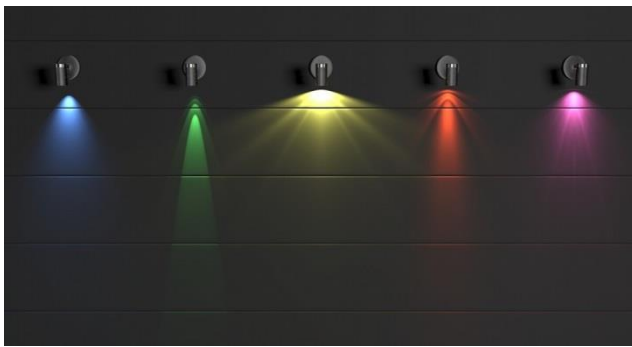


Fig. 6 Ejemplo de varios tipos de luces IES en YafaRay. Las luces IES son una variante de la luz de foco en la cual la distribución de la intensidad lumínica se encuentra controlada por un fichero de tipo IES. Esta opción tiene como objetivo reproducir el comportamiento real de los haces lumínicos de luminarias comerciales. Los ficheros IES pueden descargarse en la web de cualquier fabricante especializado o bien en la web de YafaRay. ©Álvaro Luna.

2. 3. 6 Animación y rigging

Para que exista animación en una creación 3D, la descripción que el usuario puede ver debe variar en algo con respecto al tiempo, es decir, debe existir algún movimiento de objetos y/o de cámaras, cambio de luces y formas, etc. Puede tratarse de una animación que se renderiza en tiempo real cuando se está ejecutando, o bien una animación que utiliza tres dimensiones, pero ya ha sido renderizada previamente, por lo tanto, sólo se trata de un video creado. De este modo, el momento de renderizado de la animación, es decir, el proceso de convertir las fórmulas matemáticas en imágenes digitales, marca la diferenciación entre ambas.

En el primero de los casos, la animación se renderiza en tiempo real por lo que se consume una gran cantidad de memoria y procesamiento, siendo necesaria una placa

aceleradora de gráficos que ayude al microprocesador. El más claro ejemplo de estas animaciones son los videojuegos 3D, en los que el usuario se mueve por la escena, y se tiene que ir procesando el renderizado conforme este juega. En la segunda, la animación del modelo en 3D se renderiza primero para posteriormente visualizarse como un video digital. El trabajo pesado se realiza una sola vez y luego se puede ejecutar como video, reduciéndose el procesamiento. Ejemplos de este tipo de animaciones son las películas y dibujos animados en tres dimensiones (Alegsa, s.f.).

Sin embargo, cuando se trata de animar objetos, y, sobre todo, figuras humanas o animales, dinosaurios, etc. el proceso se complica. No es tan simple como desplazar o girar un elemento, puesto que la inmensa mayoría de las veces existen piezas móviles que se desplazan y rotan unas respecto a otras, y en los casos más complejos, los personajes cobran vida, caminan, corren, ríen, lloran, etc. y el proceso se convierte en una disciplina enormemente compleja. A grandes rasgos y, simplificando mucho para animar un personaje una vez modelado y texturizado, es necesario crear un esqueleto interno de huesos virtuales, los “bones”. Las diferentes piezas de este esqueleto se hallan unidas por “links”, los cuales generan una serie de jerarquías: el hombro es el padre del húmero; éste es el padre del cúbito; el cúbito a su vez es padre de la mano y ésta de cada una de las primeras falanges de los dedos, que a su vez cada una de ellas tiene un link con otra falange y así hasta el final. Una vez creada la estructura interna del esqueleto con todos sus links se definen los límites de los movimientos, los índices de rozamiento, la viscosidad... asignándose las posibilidades de movimiento que puede tener cada pieza respecto a las demás y, finalmente, se define cómo afectan las distintas partes de la estructura interna a la “piel” externa, constituida por la malla de polígonos, para que, por ejemplo, al doblarse un brazo se produzca en la zona un pliegue y se engorde un músculo. Solo cuando esta estructura ha sido organizada perfectamente puede comenzarse a animar, haciendo que cada elemento se mueva al ritmo adecuado, controlando para ello las curvas de velocidad. Todo este proceso es únicamente posible en programas de alto nivel y dentro de estos existe una dura competencia por proporcionar las herramientas más potentes, ágiles e intuitivas para trabajar. Maya y Softimage son los líderes indiscutibles en este campo (Vila, 2000).

Todo este proceso se denomina hoy rigging, haciendo referencia al proceso mediante el cual un personaje, objeto o modelo 3D es configurado con el fin de que pueda

ser posteriormente animado. De modo esclarecedor, el proceso puede resumirse y explicarse equiparando los modelos 3D con marionetas. Éstas no pueden moverse sin un rigger que las cree y manipule y que va a actuar como un creador de marionetas digitales configurando un sistema de huesos, expresiones y scripts²⁹ para que este se mueva en la forma en que debe hacerlo (Artuza, 2011). Para que pueda comprenderse adecuadamente lo descrito, puede visualizarse uno de los muchos videos que la red ofrece sobre los tutoriales y explicaciones del funcionamiento básico y avanzado del rigging. Como ejemplo, se cita el video de YouTube *Rigging for animation. Demo reel* de Ronald Fong (2014), en el que el autor describe el rigging corporal de su personaje.

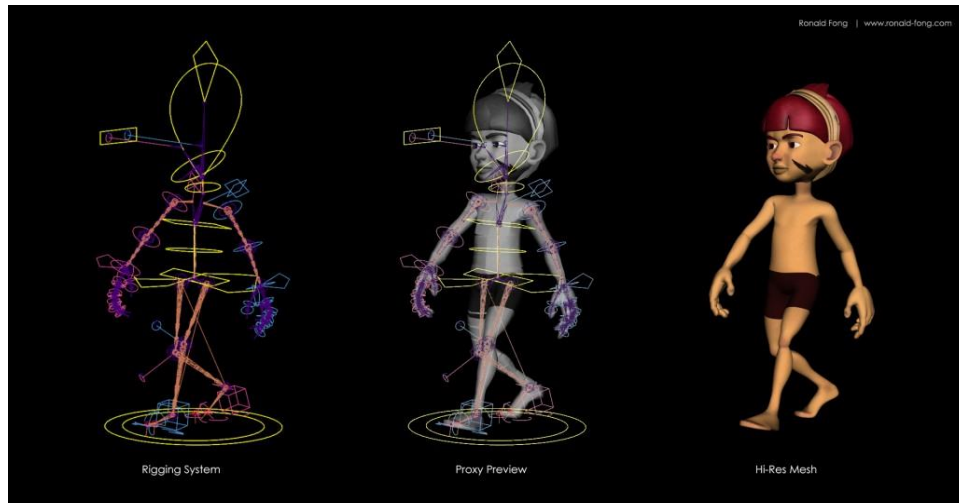


Fig. 57 Ejemplo de rigging para la animación corporal de un personaje. A la izquierda pueden verse los bones y links que hacen posible la animación del personaje; en el medio aparece la previsualización que permite ver el rig corporal junto con la piel del personaje. Por último, a la derecha aparece el personaje ya animado. ©Ronald Fong.

²⁹ Se conoce como script un texto que consta de una serie de instrucciones que deben seguir los individuos que forman parte de una pieza de teatro, cine, o programa televisivo. El término se ha trasladado al ámbito informático, tratándose aquí, por lo tanto, la programación que debe seguir el modelo.

2. 4 Post-procesado del modelo 3D

Con el post-procesado de un modelo se busca la optimización del modelo final de cara a aplicaciones posteriores y el objetivo es conseguir un modelo 3D final hermético y preparado para su traslado a la siguiente aplicación (Díaz, Jiménez, Barreda, Asensi, y Hervás, 2015, p.33).

En aquellos casos en que se va a materializar la pieza, es fundamental que previamente el modelo sea postprocesado, puesto que el hardware de la impresora, fresadora, o cualquiera que sea la máquina herramienta empleada, puede detectar fallos y no realizar el proceso o bien realizarlo materializando dichos fallos. Esta circunstancia da lugar a que se presenten errores e imperfecciones en el modelo resultante.

Si el modelo va a ser empleado para la documentación del objeto o bien cultural, es imprescindible que los fallos sean corregidos, puesto que, si la obra sufre degradaciones o desaparece, estas imperfecciones mal documentadas y los archivos que presentan fallos, conllevarán pérdidas de información que en casos de documentación es siempre relevante.

Del mismo modo, es fundamental la realización del postprocesado cuando los modelos han de ser divulgados y van a ser expuestos en museos o recorridos virtuales, o bien incluidos en visualizadores 3D o Pdf 3D, puesto que la información aparecerá con fallos y el mensaje de las obras no será transmitido correctamente.

Por lo general, tal como indica Roca-Pardiñas et al. (2008), en todas las aplicaciones de patrimonio cultural, se requiere un modelo poligonal capaz de satisfacer la demanda de representación. Sin embargo, existen casos en que la transición de una densa nube de puntos a un modelo poligonal es un proceso complejo, impreciso y laborioso (citados en García Molina y de Paula, 2012, p.281). De ahí la importancia de realizar un buen postprocesado que facilite las posteriores aplicaciones que el modelo tenga o para las cuales sea empleado.

Cuando se realiza el postprocesado de un modelo 3D, las operaciones de modelado más importantes y destacables son las siguientes (García Molina y de Paula, 2012, p.281):

- Edición de polígonos.
- Correcciones de bordes.
- Reducción del número de polígonos. Es fundamental, puesto que, con un número reducido de polígonos, se limita la carga de trabajo y, en consecuencia, el volumen de cálculos sobre el hardware.
- Rellenado de agujeros.
- Edición de superficies enteras. Para reproducir lo más fielmente posible la geometría de los objetos es necesario emplear herramientas que subdividen la malla de trabajo, por lo que el número de polígonos aumenta drásticamente. Tal y como se ha explicado, para esta estrategia se debe contar con un hardware capaz de soportar el volumen de cálculo necesario para representar escenas con cantidades elevadas de polígonos. Dependiendo del nivel de subdivisión aplicada a los objetos puede ocurrir que el equipo no sea capaz de mostrar los resultados en pantalla, en el visor 3D, o sencillamente que se bloquee (Patrimonio Virtual, 2015).

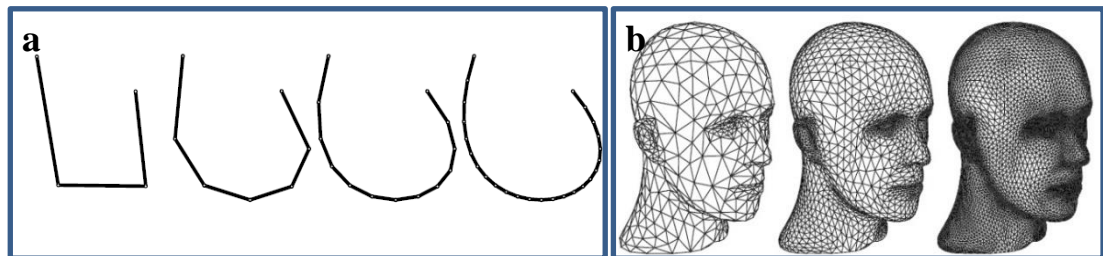


Fig. 58 La imagen (a) muestra claramente cómo actúa la subdivisión en la geometría de los objetos, aplicándola a figuras muy simples. A la izquierda aparecen 4 puntos conectados con segmentos de líneas rectas. A la derecha su versión subdividida en la que 3 nuevos puntos se han insertado entre estos primitivos puntos. Después de dos pasos más de la subdivisión la curva comienza a suavizarse. Por su parte la imagen (b) permite ver cómo actúa la subdivisión en la superficie de un modelo más complejo. ©Peter Schroder.

En caso de realizar animaciones, las dificultades aumentan, dado que la carga de trabajo del software así lo requiere. Con el fin de dar solución a este problema y optimizar así el proceso de cálculo en este tipo de operaciones, así como posibilitar al usuario una herramienta que permitiera visualizar en tiempo real la geometría generada y su comportamiento, Pixar desarrolló un conjunto de librerías opensource, software de código

abierto, que implementa una evaluación de alto rendimiento en superficies de subdivisión, empleando sus propias producciones de animación. No es una aplicación con interfaz propia, es un código que puede ser integrado en terceras aplicaciones. El programa Blender, por ejemplo, a partir de la versión más reciente 2.76b ofrece soporte, a nivel aún inicial para OpenSubdiv (Patrimonio Virtual, 2015).

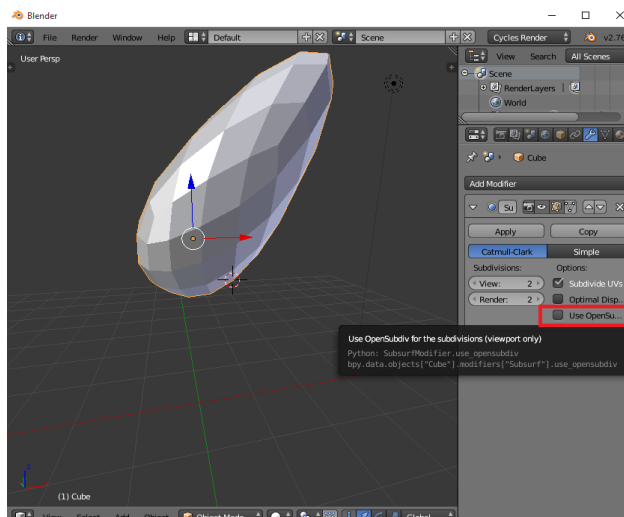


Fig. 59 Interfaz de Blender mostrando la opción OpenSubdiv computer. ©Patrimonio Virtual.

Por tanto, esta herramienta tiene el potencial de garantizar el suavizado de las superficies automáticamente, incluso cuando el modelo es animado posteriormente (De Rose, Kass & Truong, 1998).

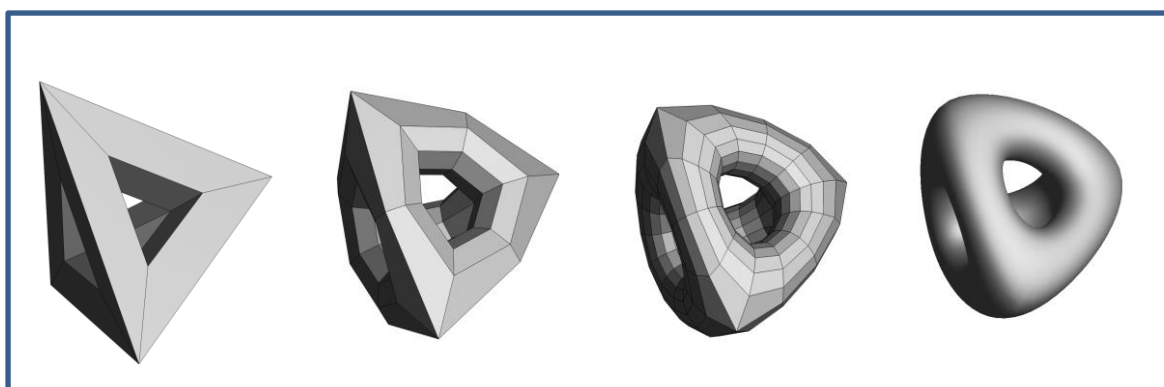


Fig. 608 Proceso de subdivisión de una malla en la que, de izquierda a derecha, aparecen la malla de control; el resultado tras una etapa de subdivisión; después de dos pasos de subdivisión y por último la superficie subdividida al límite. ©Tony DeRose, Michael Kass & Tien Truong.

Todas estas operaciones requieren un conocimiento avanzado de software de modelado 3D. Además de los posibles problemas que puedan surgir a la hora de obtener un buen mallado, existen otros aspectos negativos a tener en cuenta tales como el excesivo tiempo para mallar y editar correctamente formas irregulares, la necesidad de reducir los puntos al mallar, provocando una pérdida de información métrica; la dificultad en gestionar la malla compuesta de millones de polígonos y el alto coste de los programas comerciales de Ingeniería Inversa (García Molina y de Paula, 2012, pp.281 y 282).

2. 5 Programas de modelado 3D y postprocesado

Existe la posibilidad de postprocesar los modelos generados con los numerosos softwares que los propios dispositivos de registro (escáneres, softwares fotogramétricos...) o bien de impresión incluyen. Sin embargo, también es posible emplear otros programas más específicos que suelen ofrecer funciones que estos primeros softwares no incluyen. Además, no hay que olvidar que en ocasiones el modelo debe ser construido desde cero, puesto que no existen datos que registrar, en cuyo caso el programa debería contar con una mayor cantidad de herramientas y funciones, con el fin de obtener los mejores resultados posibles.

Para ambos casos son numerosos los programas existentes en el mercado. Existen numerosas versiones gratuitas, con prestaciones a nivel usuario, y versiones de pago, que requieren licencias y permisos, que suelen ser empleados por profesionales y expertos del modelado 3D.

Sin embargo, es muy destacable que muchos de los programas en sus versiones libres y gratuitas brindan una amplia gama de herramientas y posibilidades, por lo que dados los resultados que se obtienen en numerosas ocasiones es suficiente trabajar con ellas, sin necesidad de pagar por su uso. Por ejemplo, el clásico Paint de Microsoft ha evolucionado y actualmente se incluye por defecto en el sistema operativo Windows el programa Microsoft Paint 3D. Este último añade de un modo muy sencillo la tercera dimensión permitiendo crear modelos 3D y dar los primeros pasos en el diseño digital. Una de sus características más interesante es el uso de dispositivos como lápices digitales y pantallas táctiles. Actualmente, se encuentra en una versión preliminar que requiere formar parte del programa Windows Insider, pero puede descargarse de manera gratuita la versión compatible con sistemas Windows 10 (Educacion 3.0, 2018).

Tinkercad también es un software gratuito que se ejecuta en el navegador, por lo que no necesita instalar ningún software. Su manejo es, por otra parte, muy sencillo (Educacion 3.0, 2018). Los modelos generados pueden ser visualizados y descargados para su impresión desde la página web (Tinkercad, s.f.).

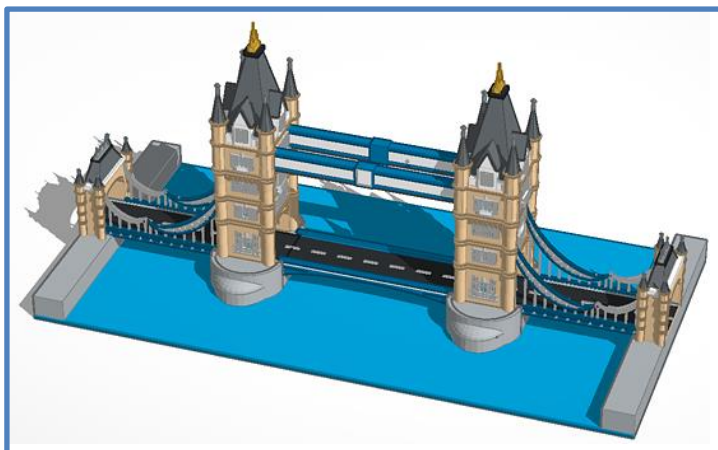


Fig. 61 London Tower Bridge del usuario El Andrew, en la página de Tinkercad. ©El Andrew.

Customizer es una plataforma web en la que se puede diseñar, crear y compartir productos en 3D, así como modificar los ya existentes. Es realmente sencilla de utilizar y es todavía más fácil exportar el diseño a una impresora 3D. Especialmente interesantes son posibilidades de aplicación en el ámbito docente, como herramientas en sus aulas (Educacion 3.0, 2018).

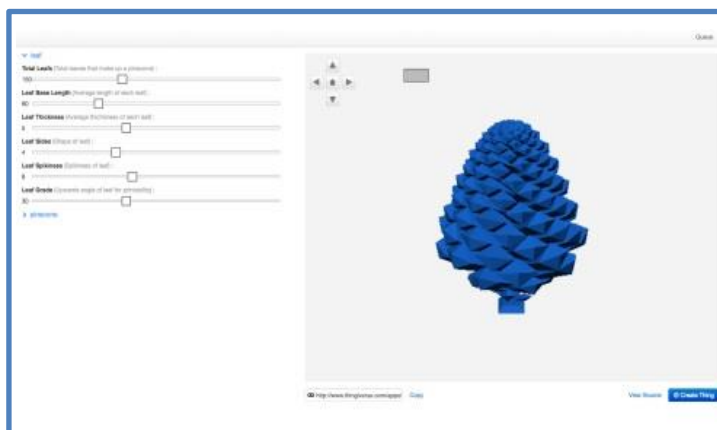


Fig. 62 Modelo 3D disponible en la web del programa Customizer. ©Customizer.

Además de estos ejemplos, podría citarse también el programa Solidworks, que constituye una opción típicamente orientada al ámbito profesional del diseño asistido por ordenador (Educacion 3.0, 2018).

Como se ha demostrado en multitud de ocasiones, el impacto de una imagen de calidad perdura y hace comprensible más rápidamente lo que se quiere mostrar. Por ello, para poder llegar a obtener una imagen de calidad, una de las tecnologías más importantes que existe actualmente es la imagen 3D, según se ha venido indicando. A continuación, se exponen los programas que ofrecen un mayor número de posibilidades y más empleados en modelado 3D. Estos cuentan con actualizaciones constantes, puesto que son los programas que se utilizan en la industria del cine, los videojuegos y la televisión (Ángeles,

2011, p.161). De este modo, el ámbito del patrimonio aprovecha esta tecnología para infinidad de propósitos, tal y como podrá observarse en los capítulos posteriores.

2. 5. 1 Blender

Blender es un programa multiplataforma dedicado especialmente tanto para el modelado, render y animación, como a la creación de gráficos tridimensionales para cine, televisión y publicidad (Oscillon online, s.f.). Entre las ventajas (Blender, s.f.) de este programa caben destacarse:

- Renderizado fotorrealista. Cuenta ahora con un potente y nuevo motor de renderizado llamado Cycles que ofrece impresionantes renderizaciones ultra realistas.
- Modelado rápido. Su amplia gama de herramientas de modelado hace que la creación, transformación y edición de sus modelos resulte sencilla.
- Materiales realistas. Con su nuevo motor de renderizado las posibilidades de recreación de materiales son infinitas.
- Rigging rápido.
- Conjunto de herramientas de animación que permite convertir personajes en impresionantes animaciones.
- Esculpido. Esculpir motivos orgánicos es muy fácil gracias al conjunto de funciones de escultura incorporado.
- Unwrapping UV rápido. Se puede aplanar el modelo rápidamente para aplicar las texturas a la imagen o bien pintar directamente en el modelo.
- Simulaciones asombrosas.
- Seguimiento de cámara y objetos de producción, lo que permite importar imágenes en bruto, realizar un seguimiento de las imágenes, áreas de máscara y ver los movimientos de la cámara en vivo en su escena 3d, por lo que no es necesario cambiar entre programas.

- Biblioteca de extensiones. El programa viene cargado con una amplia gama de extensiones que puede activarse o desactivarse fácilmente.
- Edición de video, que permite realizar acciones básicas como cortes de video y empalme, así como tareas más complejas como enmascarar vídeo.
- Formatos de archivo diferentes. Puede importar y exportar en numerosos formatos.
- Interfaz flexible, que permite modificarla a conveniencia del usuario.

Actualmente, el programa es totalmente gratuito y compatible con todas las versiones de Windows, Mac OS X, Linux, Solaris, FreeBSD e IRIX. Su interfaz gráfica de usuario no se basa en el sistema clásico de ventanas, y dispone de importantes ventajas, como la configuración personalizada de la distribución de los menús y vistas de cámara (Oscillon Online, s.f.).

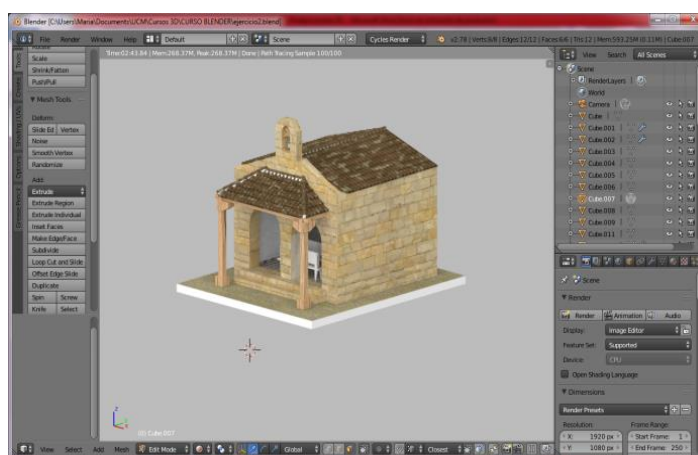


Fig. 63 Interfaz de Blender en el que aparece un modelo 3D ya texturizado y renderizado. Ejercicio del curso *Blender para la reconstrucción virtual en 3D del patrimonio (1ª Edición)*, cursado del 1 al 28 de febrero 2017, impartido por Pablo Aparicio Resco ©María Ávila Rodríguez.

Blender es uno de los programas más empleados por los profesionales del patrimonio que emplean herramientas 3D.

2. 5. 2 Autodesk

Desde 1982, Autodesk es líder en innovación en tecnologías 2D y 3D que permite a los clientes visualizar, simular y analizar sus ideas en el mundo real desde el inicio en el proceso de diseño, brindando flexibilidad para optimizar y mejorar los diseños antes de ejecutarlos. Los clientes Autodesk también pueden experimentar sus diseños antes de que estos sean reales, permitiéndoles ahorrar tiempo y dinero, mejorar la calidad, y promover la innovación (Autodesk, s.f. a).

El programa más conocido de Autodesk es **AutoCAD**, que tradicionalmente ha estado enfocado, como su nombre indica, al CAD; sin embargo, este también permite el modelado 3D. AutoCAD es un programa reconocido mundialmente puesto que desde

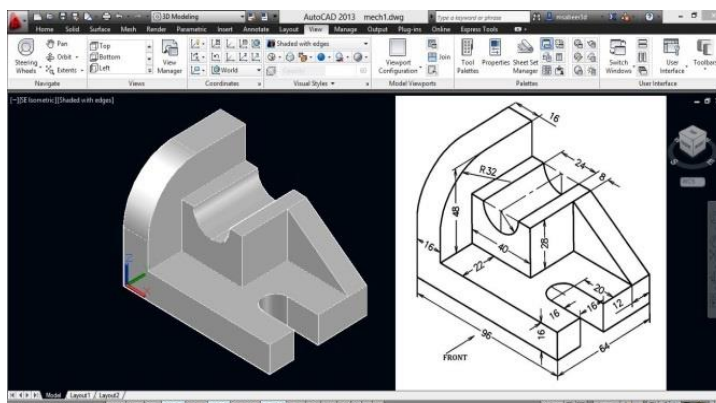


Fig. 64 Pieza en 3D diseñada a partir de AutoCAD. ©Sabeercad.

sus primeras versiones brindaba capacidades de diseño que no poseían otros programas. La mayoría de usuarios son ingenieros, diseñadores industriales y arquitectos; por lo que realmente en el campo patrimonial su uso está menos extendido, aunque no por ello pueda decirse que no se emplee para determinados proyectos más técnicos que precisen de otras herramientas a la hora de modelarse (Junkie, 2016).

Autodesk también cuenta con la aplicación **Autodesk 123D**, en la cual se abarcan múltiples aplicaciones muy relacionadas con el diseño 3D en varios ámbitos (Espeso, 2017).

Autodesk Maya es un software de animación, modelado, simulación y renderización en 3D.

El programa destaca especialmente por sus herramientas de animación y creación de personajes (Autodesk, s.f. b). Este programa ofrece una grandísima variedad de herramientas, por lo que es realmente muy usado en el campo del patrimonio para realizar recreaciones 3D y animaciones donde aparecen personajes animados.



Fig. 65 Interfaz de Autodesk Maya en la que aparece un Avatar que fue diseñado para un proyecto realizado por el Museo de América de Madrid dentro de la investigación I+D+i *Conocimiento aumentado y accesibilidad: la representación museográfica de contenidos culturales complejos*. Investigación llevada a cabo por el Grupo Museum I+D+C de la UCM. ©Gonzalo Martín Sánchez.

Autodesk 3DS MAX es otro de los programas que Autodesk ofrece para el diseño y modelado 3D, animación, simulación y software de renderizado muy utilizado en el diseño industrial, el cine, juegos y gráficos en movimiento (Olachea, 2014).

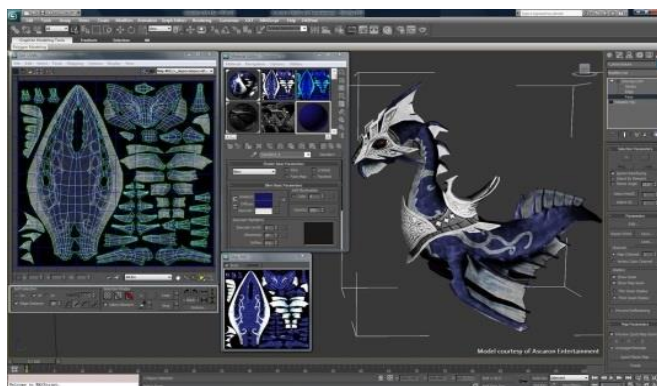


Fig. 66 Interfaz de Autodesk 3DS MAX. ©Occi Olacea.

Una opción que tiene este programa, es la posibilidad de convertir fotografías (2D) en imágenes 3D. En su tesis doctoral *Procesos digitales y sistemas de prototipado rápido aditivos aplicados a la creación escultórica de pequeño formato y relieves*, José Carlos Espinel (2016) experimenta el proceso de generar volúmenes a partir de fotografías empleando este programa, con el fin de imprimir los modelos y conseguir materializar relieves, algo muy útil en el ámbito de las Bellas Artes, muy especialmente a la hora de realizar medallas. Espinel había, trabajando en su tesis doctoral, apreciado un vacío en el desarrollo de las texturas de relieve y consideró necesario desarrollar una metodología propia y lógica que fuera aplicable para el diseño y producción de relieves y medallas mediante los sistemas de prototipado puesto que los programas de diseño 3D, como el ZBrush, que pretenden imitar el proceso creativo mediante el cual un escultor modela el barro, dejan bastante que desear puesto que el proceso no tiene nada que ver con el proceso real y para conseguir un resultado con una calidad aceptable, no solo es necesario conocer la herramienta, sino que además hay que dedicar una infinidad de horas. De este modo, investigó sobre el funcionamiento del sistema de displacement maps, cuya base es que una imagen en escala de grises es aplicada sobre la superficie de un modelo tridimensional traduciendo los diferentes tonos de gris en diferentes alturas, aplicando el blanco y tonos más claros como los elementos más altos del relieve, y los grises más oscuros hasta llegar al negro, como los elementos más bajos. Esto le resultó realmente muy interesante puesto que una imagen en 2D podía ser traducida en un volumen tridimensional aplicándola a través de un programa de modelado. Hasta el momento existía publicada poca información sobre investigación plástica en referencia a cómo proceder a la hora de desarrollar un modelo tridimensional a partir de una imagen en escala de grises, probablemente, porque es un sistema que se utiliza fundamentalmente para aplicar texturas de relieve sobre un

modelo ya desarrollado y no para la creación de auténticos relieves en el concepto más puramente artístico.

Su primera prueba fue realizada en un retrato de un niño, partiendo de una fotografía con el objetivo de traducir los volúmenes del rostro aplicando tonos más claros a las zonas más altas (reservando el blanco para la parte más alta) y los más oscuros para lo que serían las zonas más bajas del relieve. Fueron surgiendo de ese modo imágenes en escala de grises basadas en grupos de volúmenes independientes, por ejemplo, la nariz o los ojos, y no como una única imagen. Estas imágenes se fueron aplicando cada una como un mapa de desplazamiento sobre el mapa de desplazamiento anterior, jugando con la profundidad que le aplicaría a cada una en el programa de modelado 3D, en este caso 3DStudio Max. Así cada vez que aplicaba una de las imágenes el mapa de desplazamiento variaba y se desarrollaron imágenes para el volumen general de la cabeza y el cuello, la zona de los ojos, la nariz, los labios, la oreja, el pelo, la zona del pecho (camiseta) y alguna otra imagen aplicada al final para ajustar volúmenes.

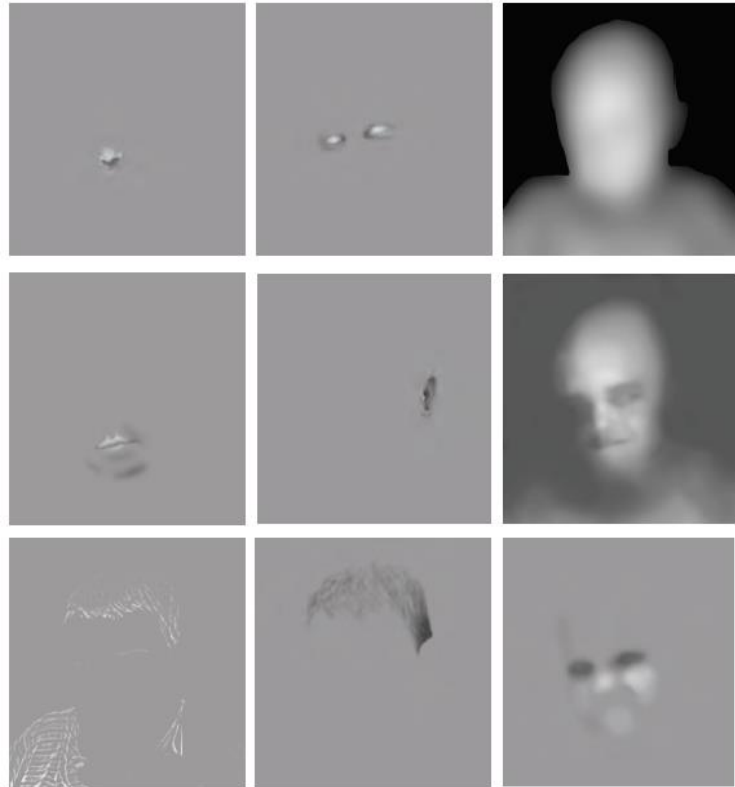


Fig. 67 Arriba aparecen algunas de las imágenes utilizadas para la creación de la pieza Samuel 1, primera aproximación al relieve mediante displacement mapping. En la parte inferior puede verse el resultado al aplicar sucesivamente las imágenes de la izquierda. Puede verse como se ha formado un relieve de muy buena calidad para conseguir una medalla o un relieve de escultura. ©José Carlos Espinel.



Tras analizar los resultados y el procedimiento Espinel planteó que, si bien el resultado es bastante interesante no lo es tanto la metodología por lo que el objetivo concreto fue encontrar una metodología y protocolo claros de cómo traducir los diferentes niveles de los volúmenes de tal forma que se consiga un volumen coherente por partes, pero también coherente en conjunto, donde los diferentes volúmenes generen una conversación lógica, armoniosa y con un resultado plástico de buena calidad.

Para el desarrollo del protocolo de creación de modelos de relieve 3D a partir de imágenes bidimensionales, es importante tener en cuenta el tipo de relieve que se desea crear: alto relieve, medio relieve o bajo relieve: si se trata de un bajo relieve no es necesaria una amplia gama de grises, ya que básicamente con blanco y negro se diseña el mapa de desplazamiento; para un alto relieve, sin embargo, es precisa una mayor gama de grises. De este modo el primer paso consiste en definir el número de niveles principales que tendrá el relieve y para cada uno de los niveles se creará una imagen que definirá los elementos cuya altura de relieve se encontrará entre la altura máxima del nivel anterior y la mínima del superior: el color blanco es el valor más alto y el negro el más bajo.

Una vez se ha obtenido la imagen definitiva esta es aplicada en el programa de modelado tridimensional donde todavía se pueden hacer algunos ajustes que pueden influir sobre el resultado final de una manera determinante, como puede ser el nivel de profundidad, lo que hace que de una misma imagen se puedan obtener resultados muy diversos (Espinel, 2016, pp.164-179).

2. 5. 3 Geomagic

Geomagic es un avanzado software que ofrece diferentes soluciones según las necesidades del usuario (3Dz, s.f.).

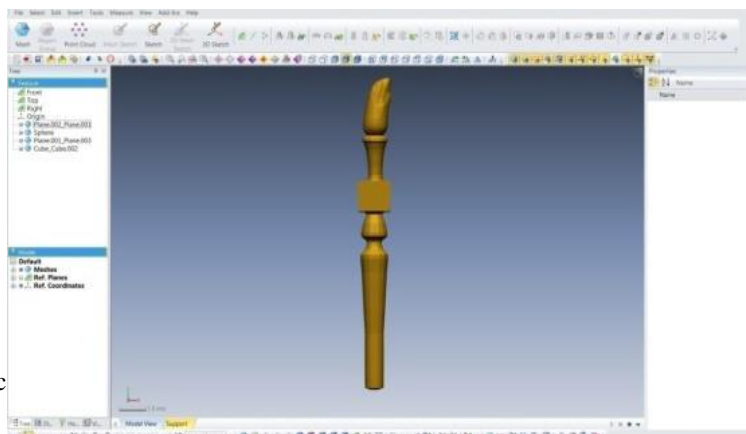


Fig. 68 Interfaz de Geomagic Design X. ©María Ávila Rodríguez.

En el ámbito del patrimonio suele emplearse Geomagic Design X, creado expresamente para convertir datos de escaneado 3D en modelos DA basados en características de alta calidad. Gracias a su combinación de extracción de modelos sólidos automática y guiada, su encaje de superficie increíblemente preciso en escaneados 3D orgánicos, su edición de mallas y su procesamiento de nubes de puntos, es considerado líder en ingeniería puesto que permite escanear virtualmente cualquier cosa y crear diseños listos para la fabricación (3Dsystems, s.f.).

2. 5. 4 Meshlab

MeshLab, es un editor de mallas que fue desarrollado con la ayuda de numerosos estudiantes durante los años 2006, 2007 y 2008. Como resultado, MeshLab se presentó como una aplicación de visualización de mallas, en la cual un objeto 3D, almacenado en una gran variedad de formatos, podía ser inspeccionado de manera interactiva y de forma sencilla, simplemente arrastrando y haciendo clic en la propia malla. Una vez cargada una malla, el usuario puede trabajar en ella por medio de un gran conjunto de filtros paramétricos directos, que realizan tareas automáticas tales como el suavizado, re-mallado o simplificación de la malla (Cignoni et al., 2008, pp.1 y 2).

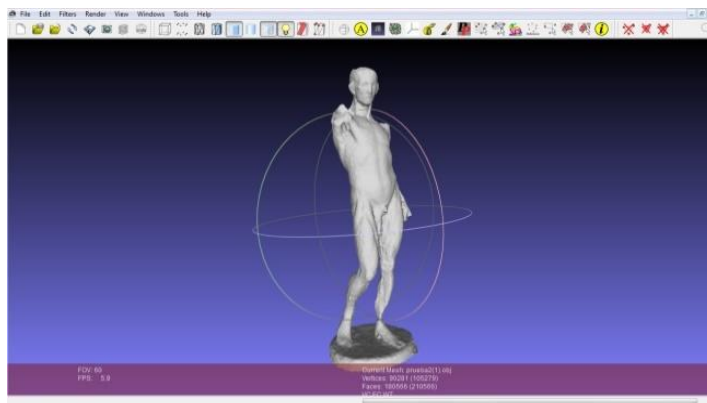


Fig. 69 Malla del modelo generado por fotogrametría de una Escultura de la Facultad de Bellas Artes de la UCM en Meshlab. ©María Ávila Rodríguez.

Las principales funciones que el programa permite realizar son (Meshlab, s.f.):

- Alineamiento de los datos en mallas y nubes de puntos procedentes de varias fuentes, incluyendo escáneres, tanto de corto como de largo alcance, y otras herramientas de imagen 3D.

- Reconstrucción mediante la cual se transforman nubes de puntos independientes en una malla triangulada, ofreciendo varias soluciones para reconstruir la forma de un objeto.
- Mapeo de colores y texturas, por medio del cual se proporcionan varios métodos automatizados y asistidos para obtener una codificación de color de alta calidad, así como un posterior procesado del color.
- Limpieza de modelos 3D, que permite eliminar aquellos elementos geométricos generalmente considerados "incorrectos", tales como errores topológicos, vértices duplicados y no referenciados, componentes pequeños, caras invertidas y muchas más singularidades geométricas.
- Escalado, posicionamiento y orientación de los modelos, que incluye funciones como la simplificación de la malla, refinamiento e incluso remallado.
- Medición y análisis del modelo. La medición interactiva punto a punto de un modelo 3D es realmente fácil en MeshLab y ofrece filtros automáticos que devuelven diversa información geométrica y topológica sobre su modelo 3D o bien un área seleccionada. Se puede calcular información geométrica diferente (como curvatura, distancia geodésica o densidad de vértices local) en mallas y modelos 3D que usan filtros automáticos.
- Preparado del modelo para una impresión 3D.

2. 5. 5 Sketchup

Este programa es muy conocido por su sencillez de manejo que presenta a la hora de dibujar. Es muy empleado para proyectos de muy diferentes campos, arquitectura, ingeniería, diseño de interiores, etc. y se caracteriza porque tiene una gran cantidad de extensiones para instalar complementos que pueden buscarse según el ámbito en el que se trabaje (Extensión Warehouse, s.f.).

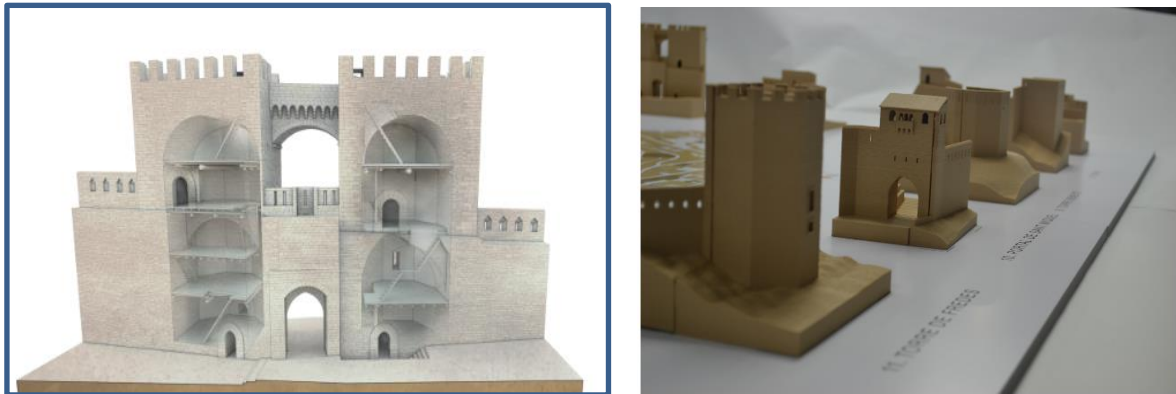


Fig. 70 Imagen de las torres que coronan el perímetro amurallado de la ciudad de Morella (Castellón). La imagen corresponde a la exposición acerca del patrimonio arquitectónico defensivo de Morella que se expuso en febrero de 2016 en la sede del Colegio Territorial de Arquitectos de Valencia. Lo particular de esta muestra, llevada a cabo por el estudio de arquitectura valenciano Balam Consultores, es que SketchUp fue la herramienta principal con la que se desarrolló la práctica totalidad de la misma. Tal y como puede verse en la imagen de la derecha, algunas de las torres fueron impresas. ©Iscar.

2. 5. 6 Z-brush y Sculptris

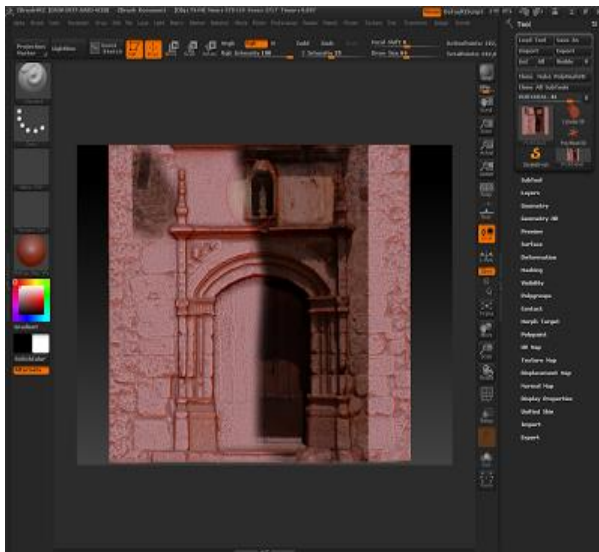


Fig. 71 Portada principal de la ermita de Nra. Sra. de la Antigua en Mérida, Badajoz, escaneada e importada a Meshlab para la obtención del modelo 3D. Para realizar los acabados y finalizar el texturizado se importó a Z-Brush. ©Groma 2.0.

Estos programas son más específicos para el esculpido 3D en lugar del modelado. Es muy frecuente que modelos generados en otros programas como Blender sean retocados en uno de estos programas, puesto que las herramientas de esculpido que presentan son muy eficaces. Hace unos años las opciones que Blender presentaba para esculpir eran de difícil manejo y obtener buenos resultados era una tarea complicada por lo que los modelos se importaban a otros programas con el objetivo de retocar y finalizar los

detalles de la superficie del modelo. Bien es cierto que los programas anteriormente citados cada vez avanzan más en sus opciones y funciones de esculpido; sin embargo, a continuación, se citan algunos programas que cumplen todas las funciones de esculpido con unas grandísimas prestaciones.

Para comenzar se ha de mencionar ZBrush, programa que ha revolucionado la industria del 3D con sus potentes funciones e intuitivos flujos de trabajo, ofreciendo las herramientas más avanzadas del mundo para los artistas digitales. ZBrush cuenta con un arsenal de características capaces de potenciar la inspiración del artista, puesto que la sensación de esculpir es muy natural y se permite el modelo al término deseado, gracias a la posibilidad de crear renders realistas con la iluminación y efectos atmosféricos deseados. Presenta también numerosas y potentes opciones de exportación por lo que, dependiendo de las necesidades del usuario, las opciones abarcables son verdaderamente amplias. La potencia de procesamiento del software permite esculpir y pintar con millones de polígonos sin necesidad de comprar costosas tarjetas gráficas (Sinapsis, s.f.).

Sculptris, de los creadores de Zbrush, es aún más sencillo de emplear y muy recomendable para principiantes, puesto que es muy intuitiva y fácil de usar, por lo que permite a los artistas centrarse en la creatividad pura. La interfaz permite una fácil navegación y cada herramienta se localiza fácilmente, por lo que incluso el usuario más inexperto es capaz de empezar a crear en unos instantes. Las técnicas aprendidas con Sculptris se traducen directamente en ZBrush y los modelos pueden ser enviados a ZBrush seleccionando la funcionalidad de “GoZ” (Sinapsis, s.f.).

Desde el lanzamiento de ZBrush hace más de una década, la compañía creadora Pixologic, ha sido reconocida por desarrollar innovaciones pioneras en el mundo del arte digital (Sinapsis, s.f.).

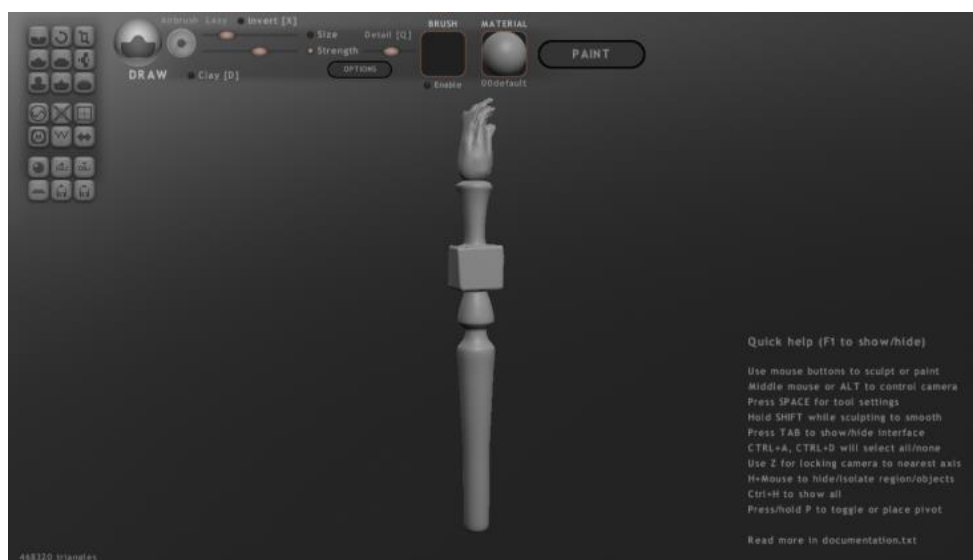


Fig. 72 Modelo 3D generado en Blender e importado a Sculptris con el fin de facilitar el trabajo de modelado. ©María Ávila Rodríguez.

Capítulo 3. Reproducción e impresión de los datos

Tal y como se indicará en los siguientes capítulos, en numerosas ocasiones no resulta suficiente para el objetivo del trabajo propuesto la obtención de un archivo 3D en pantalla, sino que, en ciertos casos o para ciertas utilidades, se hace necesario materializar la pieza. Para realizar una reproducción a partir de un archivo 3D, es decir, obtener un objeto a partir de los datos contenidos en un archivo, se pueden emplear diferentes métodos y técnicas que variarán según las necesidades del trabajo. Actualmente, las impresoras y fresadoras 3D constituyen máquinas-herramienta fundamentales (Ávila, 2017, p.194).

3. 1 Antecedentes de reproducción e impresión de los datos

Tal y como ha sido expuesto en el capítulo 1, desde la antigüedad el hombre ha buscado la manera de reproducir objetos. La reproducción de objetos ha evolucionado a la par con la tecnología de cada momento, y herramientas de la industria que en un principio se han empleado para la reproducción de objetos y, sobretodo, piezas de maquinaria, han sido extrapoladas al arte y la conservación y restauración del patrimonio. De este modo, la tecnología que se empleaba para crear una de las piezas de un motor de coche, se adaptó al arte, hasta conseguirse los actuales resultados.

A continuación, se desarrolla esta importante evolución de los sistemas de reproducción de todo tipo de objetos, desde las técnicas tradicionales de moldeo y

reproducción, a las primeras máquinas de control numérico por computador (CNC) y las impresoras 3D más novedosas.

3. 1. 1 Metodología y materiales tradicionales de realización de vaciados empleados en la actualidad

A la hora de realizar reproducciones de objetos, el sistema de moldeo tradicional mediante el empleo de materiales como gelatinas, escayola o silicona, ha sido el más empleado a lo largo de la historia. Aunque con la aparición de las nuevas tecnologías este moldeo tradicional ha visto disminuido su uso, continúa aun empleándose en el ámbito de la conservación y restauración y en ocasiones es combinado con las tecnologías 3D. Una de las empresas con mayor reconocimiento y actividad internacional en este campo es la empresa Factum Arte, de la cual, dado el gran número de proyectos que realiza, así como la calidad de los mismos, se hablará en numerosas ocasiones a lo largo de esta tesis.

Recordando la documentación referida en el capítulo 1, con la realización de un molde se obtiene el registro de la superficie de una pieza. Una vez se ha registrado la pieza, se ha de escoger el material en que se va a realizar la reproducción que, como norma general, debe cumplir principalmente dos cualidades: capacidad de registro y conexión plástica con el original. La capacidad de registro debe ser igual o mayor que la del material de moldeo y permitir el control de las propiedades plásticas tales como color, el grado de transparencia, la blandura y dureza y el peso incluso del original. Por lo que a conexión plástica respecta, debe realizarse un estudio que concluya con la decisión sobre qué materiales básicos, como cargas, pigmentos, etc se han de emplear (Pereira, 1999, pp.69 y 70).

A la hora de realizar el positivo de la reproducción, es habitual el empleo de escayola, así como resinas de diversos tipos. Algunas de las más comunes, dadas las propiedades que presentan para realizar reproducciones, son:

- Resinas epoxídicas, generalmente empleadas en vaciados de piezas semimates, mates o brillantes. Las resinas epoxi se componen de dos partes, una de ellas

incorpora el grupo epoxídico y la otra es el endurecedor que reacciona con el grupo epoxídico generando las cadenas entre las moléculas (Horie, 1987, p.170).

- Resina acrílica para materiales mates y opacos, aunque también pueden ser transparentes. La mayoría están realizadas con dos monómeros, los acrilatos (derivados del ácido acrílico) y los metacrilatos (derivados del ácido metacrilato) (Horie, 1987, p.103).
- Resina de poliuretano para realizar vaciados muy rápidos y opacos, aunque últimamente se han desarrollado también resinas transparentes. El enlace de uretano se produce por reacción entre un grupo isocianato y un grupo de alcohol. La mayoría de las formulas son privadas y los ingredientes desconocidos. Todos los isocianatos son tóxicos (Horie, 1987, pp.165 y 168). Destacan por su dureza y durabilidad, que reduce su abrasión.
- Poliéster para realizar vaciados de todo tipo, incluyendo piezas transparentes (Pereira, 1999, p.70): su base es el prepolímero de resina de poliéster. Este prepolímero se disuelve en un reactivo, estireno, para formar un líquido con la viscosidad conveniente. La copolimerización del estireno con los grupos insaturados del componente de poliéster se inicia mediante la adición de un iniciador de peróxido a la solución de resina. La reacción es catalizada mediante la acción de un acelerador incorporado en la solución de resina inicial (Horie, 1987, pp.161 y 163).

Todas estas resinas son resistentes y pueden obtenerse buenos resultados de ellas, aunque son susceptibles de amarilleamiento ante luz fluorescente y solar, sobre todo las resinas epoxídicas. Los fabricantes incluyen filtros en algunas, a fin de mejorar las posibles limitaciones que presentan. Es el caso de las resinas epoxídicas, empleadas ampliamente en el ámbito de la conservación y restauración a modo de adhesivos y a fin de realizar reintegraciones volumétricas, es frecuente que los fabricantes las desarrollen ya con estos filtros para evitar ese rápido amarilleamiento que suelen experimentar.

Las resinas para vaciados suelen combinarse con otros compuestos a fin de modificar determinadas cualidades como la viscosidad (bentonita, gel de sílice, microesferas, disolventes, etc.), el color (pigmentos, partículas metálicas o colorantes), o la dureza y resistencia (refuerzos de fibra de vidrio, de carbono y aramida).

Normalmente, estos materiales se componen de la propia resina y un endurecedor, que permite su curado. Es fundamental, cuando se trabaja con resinas, tener en cuenta el tiempo de trabajo y el de curado. El tiempo de trabajo constituye el espacio de tiempo que se extiende desde el momento en que la silicona se mezcla con el agente de curado hasta el momento en que esta ya no puede ser manipulada porque adhiere una consistencia gomosa. Por su parte el tiempo de curado o reticulado es aquel que comprende desde que la silicona es mezclada con el catalizador hasta que la mezcla ha adquirido su consistencia flexible, lo que permite poner en uso el molde de silicona (Santos, 2017, p.104)

Cuando ya se ha escogido el material para realizar el vaciado, se procede a abrir el molde, separando todas las posibles piezas que lo compongan.



Fig. 73 Proceso de vaciado. El registro ya se ha obtenido con la realización del molde, por lo que este es abierto y la pieza registrada se extrae. ©María Ávila Rodríguez.

Además, ha de seleccionarse el espesante adecuado y los pigmentos que se mezclarán con la resina. Como espesantes, funcionan especialmente bien Bentone, arcilla que aporta su propio color amarillo verdoso, o gel de sílice, que sólo enturbia la transparencia de la resina. Generalmente, antes de realizar el vaciado definitivo, se realizan pruebas de color, textura y acabados en general, aunque este paso dependerá siempre del objetivo del trabajo, puesto que puede no ser necesario. Si una pieza va a realizarse en el mismo tono del material empleado, o bien es un acabado sencillo, sin mucho detalle ni dificultad, puede realizarse sin la necesidad de efectuar previas pruebas. Sin embargo, cuando las piezas constituyen reproducciones lo más exactas posible, sobre todo de piezas policromáticas, con numerosos detalles y sutilezas, es muy común la realización de pruebas antes de realizar el vaciado final.

Cuando los materiales y sus aditivos, en caso de que los requiera, han sido convenientemente mezclados, es el momento de comenzar a realizar el vaciado en resina.

Seleccionados los pigmentos y espesante, puede procederse de dos maneras:

-Aplicando el pigmento directamente en polvo sobre la silicona (directamente o aglutinado temporalmente, por ejemplo, con etanol), con la ayuda, por ejemplo, de un pincel, y después la resina con un color de base, con ayuda de una espátula.

-Aplicando solo la resina con su color de base directamente sobre el molde.



Fig. 74 En las imágenes puede apreciarse el primer procedimiento. En la de la izquierda se ha aplicado pigmento mezclado con etanol para configurar la veta de la madera. En la de la derecha, se aprecia el momento en que se está aplicando la resina con su color de base, logrado mediante la mezcla de la misma con pigmentos y el espesante elegido (Bentone). ©MaríaÁvila Rodríguez.

Una vez todas las partes del molde han sido cubiertas por pigmento y resina, este se cierra. Transcurrido el tiempo necesario para que el material empleado endurezca (tiempo de curado de la resina), se abre el molde y extrae el modelo.



Fig. 75 La imagen de la izquierda muestra el molde convenientemente cerrado, mientras que la de la derecha corresponde a la reproducción. Como puede apreciarse, los sobrantes de la mezcla han rebasado, por lo que han de ser eliminados. ©MaríaÁvila Rodríguez.

Es muy común que sea necesario realizar retoques a la pieza, siendo los más comunes la eliminación de las rebabas generadas por el material sobrante, el retoque de posibles burbujas que no han cubierto del todo la superficie, así como zonas a las que el material de reproducción no ha llegado. Todos estos detalles deben reintegrarse y las matizaciones de colores y brillos se realizan con ceras y/u otros materiales (Santos, 2017, p.110).



Fig. 76 Resultado de la realización de la copia. A la izquierda aparece la pieza original y a la derecha la copia. ©MaríaÁvila Rodríguez.

3. 1. 2 Técnicas sustractivas: mecanizado

Otro modo de obtener datos materializados, es decir, de un modo físico, se logra mediante el empleo de las máquinas herramienta, en las que el ordenador es un elemento fundamental del proceso. Los sistemas de modelado tradicional nada tienen que ver con estos procesos; sin embargo, tal y como se irá indicando, es frecuente combinar ambos métodos.

La máquina herramienta funciona a través de técnicas sustractivas, puesto que las piezas se configuran sustrayendo materia al material de origen, que puede ser madera, metal o piedra, entre otros. De este modo, para ir configurando la forma y obtener el producto final, el material sobrante de la materia prima original es sustraído empleando distintas técnicas y herramientas.

Según Javier Eguren, director gerente del fabricante de fresadoras Nicolás Correa y presidente del Comité Europeo para la Cooperación de las Industrias de Máquinas Herramienta, CECIMO, con las máquinas herramienta se pueden realizar prácticamente todo tipo de objetos, puesto que transforman materias primas, metales y otros componentes para obtener las formas que se necesitan. Son capaces de cortar, estampar, fresar, taladrar, amolar o pulir (Spain Bussines, s.f.).

Estas máquinas herramienta han experimentado diversas revoluciones tecnológicas y son a continuación descritas por constituir la tecnología antecesora de las contemporáneas impresoras 3D.

Desde la prehistoria, la evolución tecnológica de las máquinas herramienta se ha basado en el binomio herramienta-máquina. Durante siglos, la herramienta fue empleada por el hombre como una prolongación de su mano, hasta que aparecieron las primeras máquinas rudimentarias que ayudaron en su utilización. Aunque en la antigüedad no existieron máquinas herramienta tal y como hoy en día se conocen, existieron dos esbozos de maquinaria que tenían como objetivo realizar operaciones de torneado y taladrado para configurar las formas. En ambos casos, era necesario emplear una mano para crear un

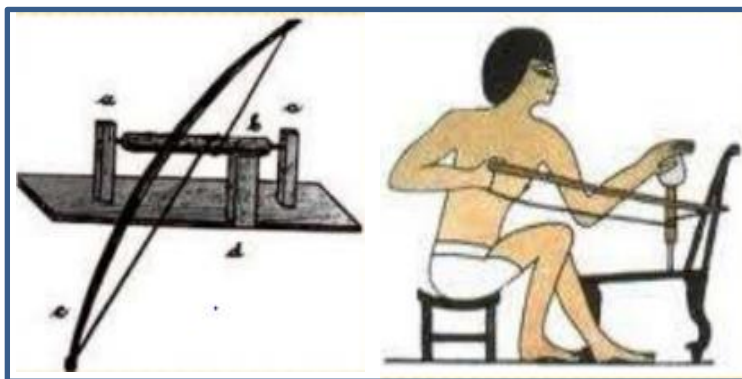


Fig. 77 En la imagen puede verse el “arco de violín”, y el mismo siendo manipulado. ©Efrain García, Lesly Thezá, Felipe Marín y Rodrigo Sepúlveda.

movimiento de rotación de la pieza en el torneado y de la herramienta en el taladrado. Así nació el llamado “arco de violín”, instrumento de accionamiento giratorio alternativo compuesto de un arco y una cuerda, empleado aún en la actualidad de forma residual en algunos países.

El torno es una de las primeras máquinas inventadas, remontándose su uso en torno al año 1000. En el 1250 nació el torno de pedal y pértiga flexible, que supuso un importante avance puesto que permitía dejar las manos del operario libres para manejar la herramienta. Ya a comienzos del s. XV se introdujo un sistema de transmisión por correa, que permitía usar el torno en rotación continua (Aldabaldetrecu, 2002).

A finales del s. XV, Leonardo da Vinci trazó un boceto de varios tornos que no pudieron ser contruidos por falta de medios; sin embargo, estos sirvieron de orientación para futuros desarrollos. Hacia 1480 el pedal fue combinado con un vástago y una biela naciendo así el torno de accionamiento continuo que, con diferentes mejoras, se siguió utilizando durante varios siglos. En la primitiva estructura de madera se introdujeron elementos de fundición como la rueda, los soportes del eje principal, el contrapunto, el apoyo de herramientas y, hacia el año 1586, el mandril, pieza metálica y cilíndrica, donde se fija el objeto a tornear.

Con la Revolución Industrial en la Inglaterra del s. XVII, se desarrollaron tornos capaces de dar forma a una pieza metálica. El desarrollo del torno pesado industrial para

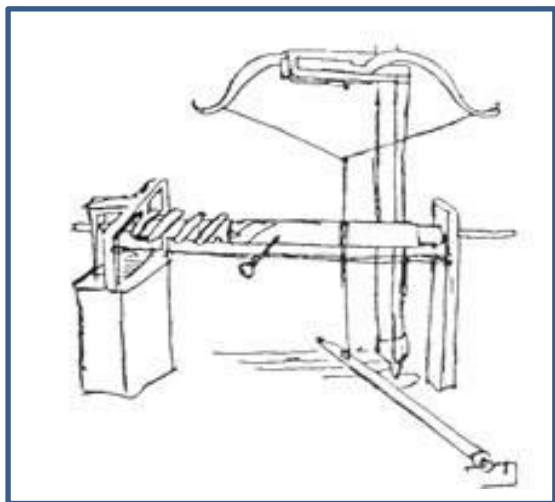


Fig. 78 Boceto de un torno de pedal y doble pértiga de Leonardo da Vinci, que no llegó a construirse por falta de medios (siglo XV). ©Patxi Aldabaldetrecu.

metales en el s. XVIII hizo posible la producción en serie de piezas de precisión. A finales de siglo se construyó un torno industrial con un portaherramientas deslizante que se hacía avanzar mediante un tornillo manual, que más tarde fue mejorado conectando el portaherramientas deslizante con el 'husillo', que es la parte del torno que hace girar la pieza trabajada. Esta mejora permitió hacer avanzar la herramienta de corte a una velocidad constante.

Durante la década de 1840 se desarrolla el torno revólver, que incorpora un portaherramientas giratorio que soporta varias herramientas al mismo tiempo y a finales de siglo se conseguía ya cambiar las herramientas de forma automática. En 1839 patentó un torno paralelo para cilindrar y roscar con bancada de guías planas y carro transversal automático, que tuvo una gran aceptación.

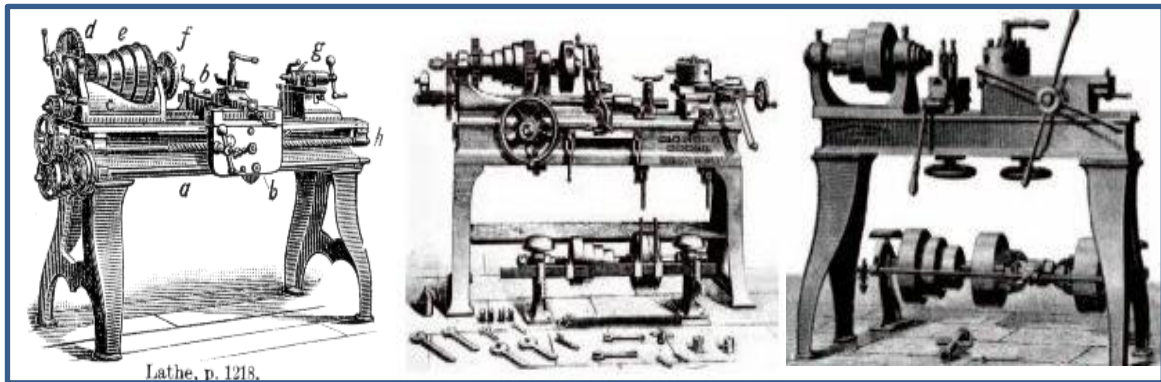


Fig. 79 Diferentes imágenes en las que se muestran tornos antiguos. Puede apreciarse como a medida que la máquina herramienta evoluciona, las piezas de maderas son sustituidas por metálicas. ©Carlos Macias.

A principios del s. XX, los motores de corriente continua fabricados a pequeña escala y los de corriente alterna reciben un gran impulso, reemplazando a las máquinas de vapor y a las turbinas encargadas de accionar hasta ese momento las transmisiones de los talleres industriales. Poco después, muy lenta pero progresivamente, se acoplan directamente de forma individualizada a la máquina herramienta, así como el sistema hidráulico (Macias, 2008).

La reciente descripción realizada con referencia al torno tiene como objetivo ejemplificar e ilustrar la evolución de una máquina herramienta fundamental, aunque otras como la fresadora y el martillo pilón han sido igual de importantes para la historia.

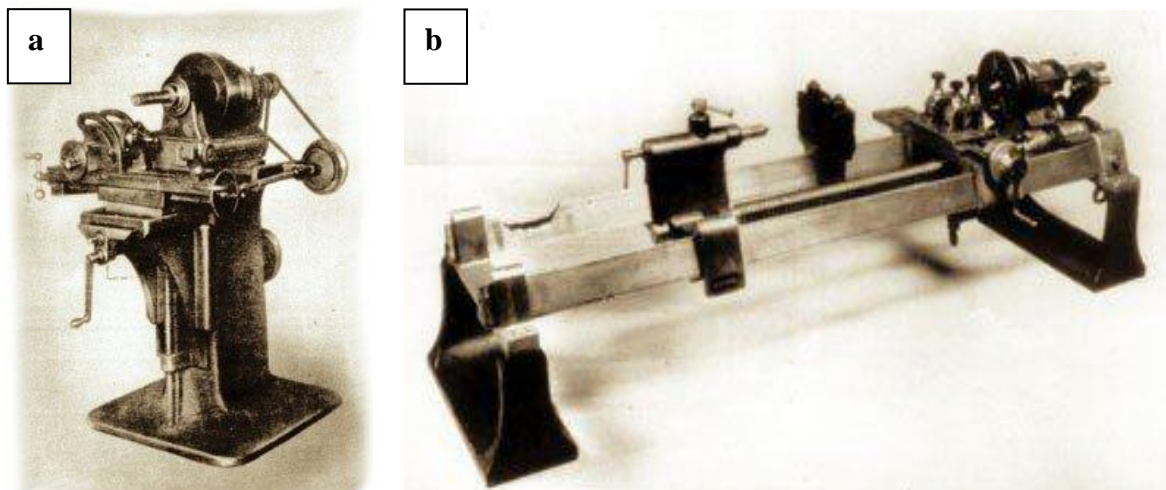


Fig. 80 Siglo XIX, desarrollo industrial: a) primera fresadora universal, fabricada por Joseph R. Brown en 1862. Estaba equipada con divisor, consola con desplazamiento vertical, curso transversal y avance automático de la mesa longitudinal con la aplicación de la transmisión Cardan, b) torno para cilindrar de Maudslay, que marcó una nueva era en 1797. Su influencia en las máquinas herramienta británicas perduró durante gran parte del siglo XIX a través de sus discípulos. ©Patxi Aldabaldetrecu.

La electrónica y la informática provocaron una nueva revolución industrial en las máquinas herramientas. En la década de 1970 se impuso el CNC, en el que la maquinaria se controlaba con un programa informático (Spain Bussines, s.f.).

Los orígenes del CNC se remontan a 1946 momento en que la compañía del Sr. John Parsons fabricaba palas rotativas para helicópteros durante la II Guerra Mundial. Parsons desarrolló programas que emplearían las tarjetas perforadas de la empresa IBM para resolver problemas complejos en el diseño estructural y aerodinámico de las palas. En 1949 diseña un sistema mediante el que controlaría totalmente una fresadora, construyéndose la primera máquina "controlada numéricamente", que se utilizaría para fabricar paneles de alas para un nuevo bombardero. En 1969 adaptó el sistema a la fabricación de patrones de la fundición del poliestireno, proceso pronto utilizado por los fabricantes de automóviles en todo el mundo para la obtención de moldes de fundición. Desarrolló además numerosas técnicas de gestión y fabricación, así como significativas contribuciones a la industria de la aviación, especialmente en el área de compuestos, entre otros muchos como el adhesivo para componentes metálicos de aeronaves y el diseño y construcción de grandes líneas de combustible para los cohetes de refuerzo Saturn V, de la expedición realizada a la luna (American Machinist, 1998).

Estas primeras fresadoras controladas numéricamente son las precursoras de una gran cantidad de máquinas herramienta que posteriormente implantaron los Sistemas de CNC. Revolucionaron así el mundo de la industria puesto que, gracias a los nuevos métodos de manufactura, se ampliaban la precisión y la rapidez en la reproducción de piezas iguales.

Al mismo tiempo, aparece otro sistema de diseño asistido por computadora además del existente DA, la FA, que proviene de la terminología anglosajona CAM (Computer Aided Manufacturing) y contiene toda la información que define los parámetros de proceso: las trayectorias xy , continuas o discontinuas, que seguirá el cabezal para crear la capa, el descenso z de la mesa que soporta las capas creadas, la velocidad de los movimientos y los demás parámetros propios de cada tecnología como intensidad de radiación o presión de inyección.

De este modo, la FA es fundamental en operaciones de mecanizado con control numérico, por la posibilidad de describir la trayectoria que las herramientas deben seguir para diversas operaciones, como por ejemplo torneado, fresado y taladrado. Las

instrucciones o programas se generan en el ordenador, y pueden ser modificadas por el programador para optimizar la trayectoria de las herramientas.

Las tecnologías DA/FA han estado muy unidas, puesto que lo que se diseñaba con el DA se materializaba físicamente con el FA.

En la actualidad la inmensa mayoría de máquinas herramienta fabricadas en España están equipadas con sistemas de control por software (Spain Bussines, s.f.) y dirigen el posicionamiento de un dispositivo mecánico móvil mediante órdenes basadas en un modelo numérico, es decir, el sistema permite que mediante un software se le den a ese dispositivo un conjunto de órdenes, por lo que se controla en todo momento la posición del elemento físico, que normalmente es una herramienta montada en una máquina (CadCamCae, s.f.).

Para conseguir con una máquina CNC un determinado resultado, se debe diseñar la pieza en DA, modelarla con un programa de modelado 3D, u obtenerla mediante escaneado o fotogrametría. Posteriormente es necesario generar las trayectorias de herramientas mediante FA, por lo que se han de especificar en el software las dimensiones y ubicación de la materia prima, las dimensiones y características de la herramienta y las velocidades de los ejes y el cabezal. Las herramientas para realizar todo esto tienden a ser complejas, por lo que el proceso requiere formación especializada a fin de conseguir que los resultados sean óptimos.

Actualmente, las tecnologías DA y FA constituyen una de las mayores fuerzas tecnológicas y económicas jamás vistas en la industria; sin embargo, esto no fue siempre así, puesto que en sus comienzos parecía muy poco probable que estas tecnologías terminasen por entrelazarse y constituyesen las fuerzas más poderosas en el mundo industrial; de hecho, la industria pensaba que ninguna de las dos estaba destinada a tener un gran impacto económico (American Machinist, 1998).

Las técnicas CNC alcanzan hoy en día un rango de aplicación cada vez más amplio, gracias a los continuos avances de la tecnología informática.

La aplicación de estos sistemas en las máquinas herramienta no solo ha permitido aumentar la productividad industrial notablemente, sino que, además, ha posibilitado la realización de réplicas con un elevado grado de precisión. Por ello, las posibilidades a la

hora de reproducir piezas, modelos, o esculturas se han multiplicado, y estas técnicas se han incorporado tanto al ámbito de la conservación como al de creación artística.

Una de las máquinas herramienta que más relevancia han tenido en el ámbito artístico y el de la conservación, es la fresadora. Al tratarse de una técnica que sustrae materia de un bloque, el proceso era difícil de aplicar en modelos con partes internas o geometrías complejas o delicadas, por lo que no solían emplearse para piezas de tamaño pequeño o de gran detalle (Espinell, 2016, p.59).

3. 1. 3 Técnicas aditivas: fabricación por capas

La fabricación por capas, de ahora en adelante FC, comprende una serie de tecnologías de alto grado de automatización y flexibilidad de reciente desarrollo y rápida evolución con la que se crean objetos tridimensionales capa por capa, empleando variedad de procesos y materiales (Ardila, 2007).

La FC inicialmente buscaba satisfacer la necesidad de crear rápidamente modelos tridimensionales reales, denominados prototipos. Este tipo de manufactura posibilita:

- El *prototipado rápido* (PR) en comparación con los demás procesos de fabricación, el que permite interactuar más rápidamente y a bajo costo con prototipos de los productos diseñados. El PR permite así la fabricación rápida de modelos físicos en tres dimensiones utilizando datos de DA (Stratasys, s.f.), lo que representa un gran avance a la hora de reproducir datos.
- Las *herramientas rápidas*, que comprende la fabricación de patrones y modelos para fundición e inyección, así como de moldes.
- La *manufactura rápida*, que comprende la fabricación de productos de consumo masivo.

El concepto básico del sistema de fabricación mediante prototipado rápido consiste en la creación de un modelo tridimensional mediante la adición de sucesivas capas de material, al contrario que los métodos sustractivos, que tal y como se ha indicado, conforman la pieza/modelo por arranque de material (Roig, 2006, p.42).

El proceso general y común de creación de un modelo es descrito por Juan Gonzalo Ardila (2007), Ingeniero Mecánico de la Universidad Nacional de Colombia en su trabajo *Manufactura por capas: Prototipado rápido*, así como por Daniel Roig Broiman (2006) en su artículo *Prototipado rápido e innovación* y puede resumirse en:

1º Prototipado virtual, es decir, creación del modelo mediante DA. Existen muchos programas DA que permiten el modelado de sólidos entre ellos SolidWorks, SolidEdge e Inventor, programas que utilizan diversos métodos de representación de sólidos.

2º Preparación del modelo y del equipo. Durante la conversión del modelo (en el programa DA) en el archivo necesario³⁰ para que el programa de la máquina materialice los datos, solían generarse diversos errores como truncamientos, normales inconsistentes o incorrectas, vacíos, caras degeneradas, etc... por lo que se desarrollaron programas de reparación que se encargan de identificar y corregir errores en los archivos. Una vez el archivo se encuentra listo para ser materializado, se somete a los procesos de orientación, rebanado, generación de soportes y planteamiento de trayectorias. La orientación es el posicionamiento de la pieza en el espacio de trabajo, es decir la dirección de fabricación de la pieza. El rebanado consiste en dividir el modelo en diferentes capas bidimensionales, para ello se genera la intersección del modelo con planos perpendiculares a la dirección de fabricación separados por una distancia igual al grosor de la capa que permite el equipo, el programa calcula la recta de intersección con cada triángulo cortado y une todas las rectas para determinar el contorno de cada capa para la obtención de la pieza. Los soportes son utilizados durante el proceso de fabricación de la pieza para servir de apoyo temporal a los salientes de la pieza con el fin de mantener su estabilidad, sostener paredes horizontales o inclinadas o prevenir la contracción. No todas las tecnologías requieren la generación de soportes. El planteamiento de las trayectorias consiste en buscar la forma en que serán contruidos los contornos y las capas de la pieza. Al finalizar este proceso, el programa permite el análisis del archivo y la creación de un archivo FA en términos CNC, que contiene toda la información que define los parámetros de proceso: las trayectorias x-y

³⁰ Más adelante se tratará sobre los formatos y archivos.

(continuas o discontinuas) que seguirá el cabezal para crear la capa, el descenso z de la mesa que soporta las capas creadas, la velocidad de los movimientos y los demás parámetros propios de cada tecnología.

3° Fabricación de la pieza. Los movimientos del cabezal y la mesa del equipo son guiados y controlados por el controlador lógico programable, PLC. La fabricación de las piezas varía de un equipo a otro.

4° Postprocesado. Una vez más esta acción depende directamente de la tecnología aplicada o bien de las propiedades requeridas de la pieza, puesto que puede ser necesario la eliminación de los soportes, el taladrado, un acabado superficial, los recubrimientos, tratamientos térmicos o limpiezas, entre otros muchos.

Estos procesos pueden tardar en producir una pieza desde pocos minutos hasta horas, sin embargo, mediante sistemas tradicionales el trabajo podría convertirse, en ocasiones, en semanas o incluso meses. De este modo, estos procesos eran empleados para fabricar prototipos de una forma rápida y barata, puesto que no precisaban crear los costosos moldes ni seguir los procesos de fabricación para ver y analizar un prototipo antes de una gran producción. Sin embargo, en la actualidad, gracias a la gran variedad de procesos y materiales que pueden utilizarse, desarrollados a continuación, son considerados como un método más bien de fabricación y los productos que fabrican son numerosas veces contemplados como productos finales (Espinel, 2016, p.59).

En la mayor parte de técnicas de FC, como a continuación se explica, la creación de los prototipos se inicia en la parte inferior del modelo y finaliza en la superior. Además, tal y como ha sido ya introducido en líneas anteriores, en algunas de las tecnologías y para determinados modelos, es necesario crear no sólo su propia geometría, sino que también es imprescindible generar una serie de columnas conocidas como soportes que permitan soportar la pieza a medida que ésta se va generando (Infante, 2012). Por ello, según el modelo y proceso con que se vaya a producir el objeto, el software de la tecnología empleada calcula la estructura de soportes necesarios para asegurar la fabricación correcta del modelo si este tiene partes delicadas como voladizos o secciones finas (Espinel, 2016, p.63). A diferencia de la opinión generalizada, la generación de soportes es independiente al tamaño de impresión, puesto que pueden ser igual de necesarios en piezas de pequeño tamaño (*Fig.81*), como en aquellas de mayor tamaño (*Fig.82*).

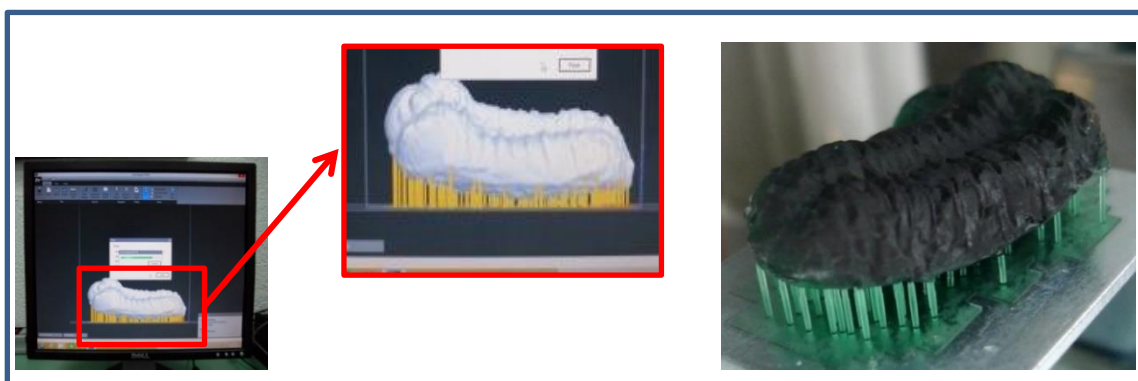


Fig. 81 La fotografía de la izquierda muestra la pantalla de un PC en el que aparece el software de la impresora 3D ProJet 1200. La pieza que va a ser impresa aparece en tonos grises, y tal y como puede observarse en el detalle de la derecha; en amarillo pueden verse todos los soportes que van a emplearse para la impresión. Por su parte, en la imagen de la derecha, aparece la pieza ya impresa con la resina acrílica de los cartuchos VisiJet FTX Green, mediante la técnica de estereolitografía (SLA) en la Facultad de Bellas Artes de la UCM. Pueden apreciarse claramente todos los soportes que la impresora ha empleado para sustentar la pieza durante su proceso de fabricación, necesarios a pesar de ser una pieza de dimensiones muy pequeñas, puesto que el volumen máximo de impresión es 43 x 27 x 150mm. ©Sonia Santos Gómez.

Fig. 82 En la imagen puede verse un ejemplo de pieza grande un tórax impreso a escala 1:1 en el CSIC, con la impresora Delta WASP 40/70. Esta es parte de la gama de impresoras industriales WASP 3D ofrecidas por Daemon3D Print. Su volumen máximo de construcción es de 40 x 70 cm y su característica más distintiva es que mientras la mayoría de impresoras MDF 3D trabajan en el sistema cartesiano, esta impresora utiliza el sistema geométrico Delta, que consta de 3 brazos principales que se conectan a la extrusora, que se mueven hacia arriba y hacia abajo de forma independiente. La posición de la extrusora se estima mediante el uso de funciones trigonométricas lo que hace que el vector de movimiento sea más preciso ya que la inercia se reduce. ©María Ávila Rodríguez.



3. 1. 3. 1 Evolución y técnicas FC

En la siguiente tabla 2, extraída del trabajo anteriormente citado de Juan Gonzalo Ardila (2007), pueden observarse distintas técnicas de FC. Para su explicación, el autor ha organizado la información de la siguiente manera: en la primera columna aparece el año de implantación de la tecnología, seguida del nombre de la misma, el estado inicial del material y, finalmente, la empresa que desarrolló la patente.

AÑO	TECNOLOGÍA	ESTADO INICIAL DEL MATERIAL	EMPRESA COMERCIAL
1986	Estereolitografía Stereolithography — SL	Resina fotosensible en estado líquido	3DSystems
1987	Manufactura de partículas disparadas Ballistic_particle_manufacturing — BPM	Material fundido o semifundido	BPM
1988	Fabricación laminada Laminated object manufacturing — LOM	Película de material enrollada	Helisys Cubic Technologies
1988	Fabricación automática diseño controlado Design controlled automatic fabrication — De5CAF	Resina fotosensible en estado líquido	Light sculpting
1988	Forma fundida (método de deposición de soldadura) Shape_melting_(weld_deposition)	Material fundido o semifundido	Babcock & Wilcox
1989	Sinterizado selectivo láser Selective laser sintering — SLS	Material particulado	DTM 3DSystems
1990	Fotopolimerización por UV Solid ground curing — SGC	Resina fotosensible en estado líquido	Cubital (Israel)
1991	Fabricación laminada Laminated object manufacturing — LOM	Película de material enrollada	Kira (Japón) Solidimension 3DSystems
1991	Inyección de fotopolímero Jetted photopolymer	Resina fotosensible en estado líquido	Brother Kogyo Kabushiki Kaisha (Japón)
1992	Deposición de hilo fundido Fused deposition modelling — FDM	Material fundido o semifundido	Stratasys
1992	Partículas disparadas con material soporte Inkjet whit second support material	Material fundido o semifundido	3DSystems Solidscape
1992	Modelado multibocalla Multijet modeling (Thermal SL) — MJM	Resina fotosensible en estado líquido	3DSystems
1993	Proyección aglutinante Direct_shell_production_casting — DSPC	Material particulado	Soligen
1993	Impresión tridimensional 3D printing — 3DP	Material particulado	Zcorp Prometal
1993	Partículas metálicas disparadas Liquid_metal_jet_printing — LMJP	Material fundido o semifundido	Incre
1998	Fusión por rayo de electrones Electron_beam_melting — EBM	Material particulado	Arcam limited (UK)
2000	Conformado láser de material particulado Laser_powder_forming — LPF	Material particulado	Optomec
2001	Prototipado rápido congelado Rapid freeze prototyping — RFP	Agua en estado líquido	New Jersey Institute of Technology
2001	Variante de estereolitografía Stereolithography (variant) — SL	Resina fotosensible en estado líquido	University of Connecticut
2003	Variante de sinterizado selectivo láser Selective laser sintering (variant) — SLS	Material particulado	Speed part RP AB (Suecia)
2003	Sinterizado selectivo por inhibición Selective inhibition sintering — SIS	Material particulado	University of Southern California

Tabla 2. Historia del desarrollo de la fabricación por capas. ©Juan Gonzalo Ardila.

En el cuadro pueden observarse una gran cantidad de tecnologías y variaciones de las mismas. Las más comunes son, la estereolitografía, la fotopolimerización de resinas mediante lámpara UV, el corte y laminado, el modelado por deposición fundida, la sinterización selectiva por láser y la manufactura de partículas disparadas.

A continuación, se detallan y clasifican estas tecnologías de acuerdo al estado del material empleado para la fabricación del prototipo.

3. 1. 3. 1. 1 Materiales líquidos

La **estereolitografía** (SLA) es la técnica que supone el inicio de las FC en 1987. Consiste en solidificar una resina fotocurable inicialmente en estado líquido mediante la acción de un láser ultravioleta. La solidificación se realiza por capas, en las que se aplica puntualmente radiación UV siguiendo las trayectorias establecidas para su creación (Ardila, 2007; Sánchez Jiménez, Fernández y Llorente, s.f.).

Esta técnica consta de un recipiente que contiene un volumen determinado de resina polimérica fotosensible que polimeriza al entrar en contacto con la radiación UV que emite un láser. Este dibuja la superficie y contorno de la sección que debe formar o bien, fabricar. El láser ultravioleta suele ser del tipo CO₂/HeCd, de baja potencia, y el punto de aplicación del haz láser se controla mediante dos espejos galvanométricos, que realizan el barrido en cada capa bidimensional. Al tratarse de un proceso en estado líquido, la creación de soportes para superficies horizontales es necesaria puesto que, de lo contrario, las distintas capas o voladizos que forman la pieza caerían al no ser auto soportados por la resina líquida no solidificada (Ardila, 2007; Roig, 2006, p.43).

El proceso comienza con el elevador situado a una distancia de la superficie del líquido igual al grosor de la primera sección a imprimir y el láser sigue la superficie de la sección y su contorno. Una vez solidificada esta sección, el elevador baja hasta situarse a la altura de la siguiente capa, repitiéndose la operación hasta completar el modelo. Para obtener unas características mecánicas óptimas de las piezas generadas, los modelos

generalmente son sometidos a un post-curado en un horno especial de rayos UVA (Infante, 2012).

Los sistemas de los que se compone el equipo son:

- Un sistema óptico responsable de la orientación y velocidad en la formación de las trayectorias X-Y que generan cada capa, compuesto por un dispositivo láser y un equipo de deflexión, lentes y espejos.
- Un sistema de elevación de la plataforma que genera el movimiento vertical, que tras la solidificación de cada capa desciende una altura igual al espesor de la capa para iniciar la formación de la siguiente.
- Un dispositivo dispensador responsable de homogeneizar la capa de resina antes de que sea expuesta a la radiación.

Las aplicaciones de esta tecnología se extienden a todos aquellos sectores industriales u oficinas técnicas de desarrollo de producto que precisen de un prototipo funcional, fiel desde el punto de vista dimensional, prototipo de piezas pequeñas con un gran nivel de detalle, agradables al tacto y la vista, fáciles de pintar, pulir y tratar en general; prototipos con acabados superficiales excelentes, siendo idóneos para piezas masters, para coladas al vacío en moldes de silicona y prototipos translúcidos para apreciar interferencias interiores (Infante, 2012).

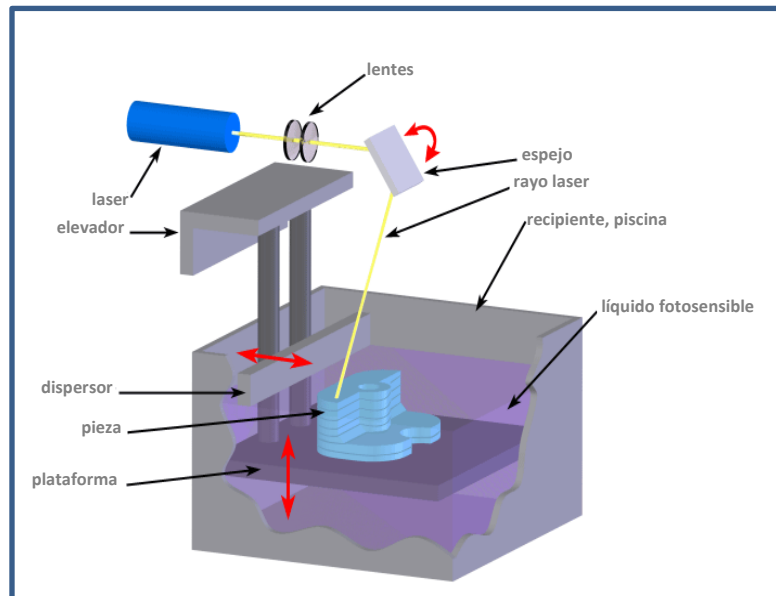


Fig. 83 El esquema muestra el funcionamiento general de la estereolitografía. ©CustomPartNet.

La **fotopolimerización de resinas mediante lámpara UV** consiste, como la SLA, en la solidificación de un fotopolímero o resina fotosensible. Sin embargo, en este caso se irradia con una lámpara de UV de gran potencia todos los puntos de la sección simultáneamente. En lugar de usar un láser explorador para realizar el curado de una capa dada, la capa completa se expone a la luz UV a través de una máscara que se coloca encima de la superficie de un polímero líquido. El proceso de endurecimiento requiere de 2 a 3 segundos por capa. Para ello, en primer lugar, se genera un modelo DA dividido por capas y para cada capa se genera una máscara. Se distribuye una capa plana delgada de fotopolímero líquido sobre la superficie de trabajo y se coloca la máscara encima, exponiendo entonces el conjunto a una fuente UV de alta energía. El líquido expuesto a la fuente solidifica y el que queda oculto por la máscara queda en estado líquido. Acto seguido se limpia el área de trabajo retirando el líquido sobrante y se rellenan las áreas abiertas de la capa con cera caliente, la cual servirá de soporte al enfriarse (Infante, 2012). El prototipo debe ser post procesado para extraer la cera de soporte (Roig, 2006, p.44).

Los materiales empleados son fotopolímeros y resinas fotosensibles y se emplean en la fabricación de modelos para: presentaciones de diseño conceptual, diseño de pruebas, test de ingeniería, herramientas y aplicaciones de fundición; y en medicina, para diagnóstico, material quirúrgico, diseño de prótesis, etc (Infante, 2012).

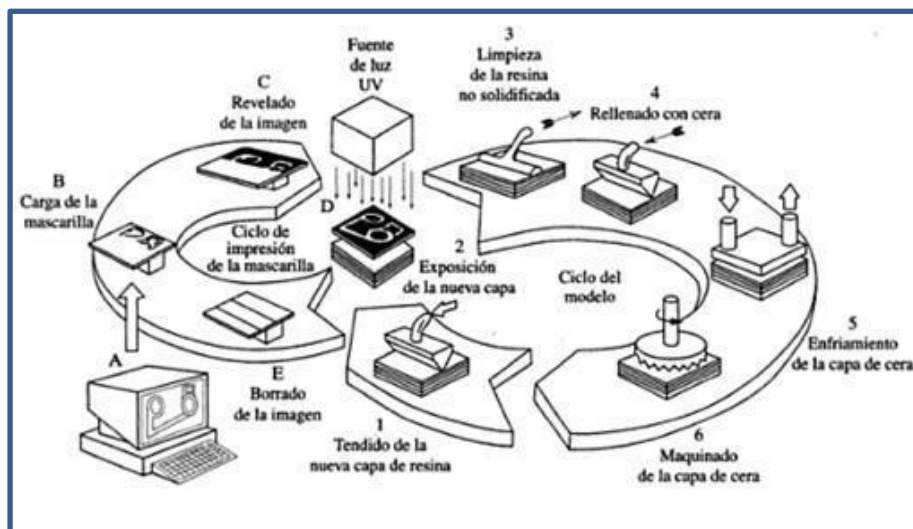


Fig. 84 En el esquema aparece el procedimiento en ciclo de la técnica fotopolimerización de resinas mediante lámpara UV. ©Rafael Infante Martín.

3. 1. 3. 1. 2 Materiales sólidos

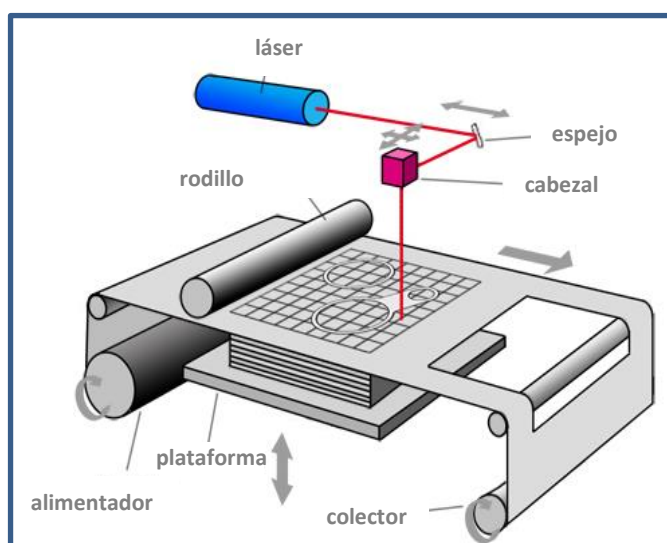
El **corte y laminado**, consiste en una fina hoja de papel bañado en resina polimérica enrollada en un rodillo alimentador conectada a su vez a un rodillo colector. El láser corta los contornos de la pieza sobre el papel de un espesor aproximado (variando según las tecnologías) de 0,1 mm de espesor correspondiente a la altura de la capa con el eje XY (Sánchez Jiménez et al., s.f.). El papel se posiciona en la plataforma y es apisonado por un rodillo caliente de tal manera que la nueva capa de material se adhiere a la anterior (Ardila, 2007).

De este modo, la máquina está formada por:

- Un sistema óptico, formado por el dispositivo láser encargado del corte del contorno de cada capa a una profundidad igual al espesor de la hoja de material, el equipo de deflexión (lentes y espejos) y el cabezal óptico x-y.
- Un sistema alimentador, que se encarga de proveer el material para cada capa a una temperatura preestablecida y recolectar parte del desperdicio de materia prima mediante dos rodillos.
- Un sistema laminador, que consta de un rodillo caliente que se encarga de presionar cada nueva capa sobre la anterior permitiendo la adherencia entre ellas antes de ser cortado por un láser.
- Un sistema elevador, es decir la plataforma móvil, que desciende un espesor de hoja a cada paso del proceso (Ardila, 2007; Sánchez Jiménez et al., s.f.).

El sistema no necesita la fabricación de soporte ni post-procesado de la pieza, salvo que se quiera evitar la porosidad en modelos de papel, donde se requerirá un sellado con resina (Roig, 2006, p.44).

Fig. 85 La figura muestra el esquema de funcionamiento del corte y laminado. ©Rocbor.net.



En principio cualquier material en lámina con adhesivo puede ser empleado en esta tecnología; sin embargo, habitualmente se usa el papel Kraft con polietileno termosellable, por su disponibilidad y rentabilidad. Por lo que a sus aplicaciones se refiere, cubría un amplio espectro de industrias, tales como la aeroespacial y la automoción, productos de consumo y dispositivos médicos, desde el propio instrumental médico a las prótesis. Permitía ver la forma final, el tamaño y la función de los prototipos, así como producir un pequeño volumen de productos terminados. Era muy empleado para visualizar un producto en sus dimensiones exactas, lo cual permite tener una réplica real del producto realizando pruebas de consumo, introducción en su comercialización, muestras de embalaje, etc (Infante, 2012).

El **modelado por deposición fundida (MDF)** es un sistema desarrollado por Scott Crump, fundador en 1989 de Stratasys, a finales de 1980, convirtiendo el nombre en inglés Fused Deposition Modeling y las siglas FDM® en una marca registrada de esta empresa. Por ello los miembros del proyecto RepRap acuñaron la nomenclatura Fused Filament Fabrication (FFF), con el fin de poder tener un término con el que referirse a este proceso sin las restricciones legales que presentaba FDM®.

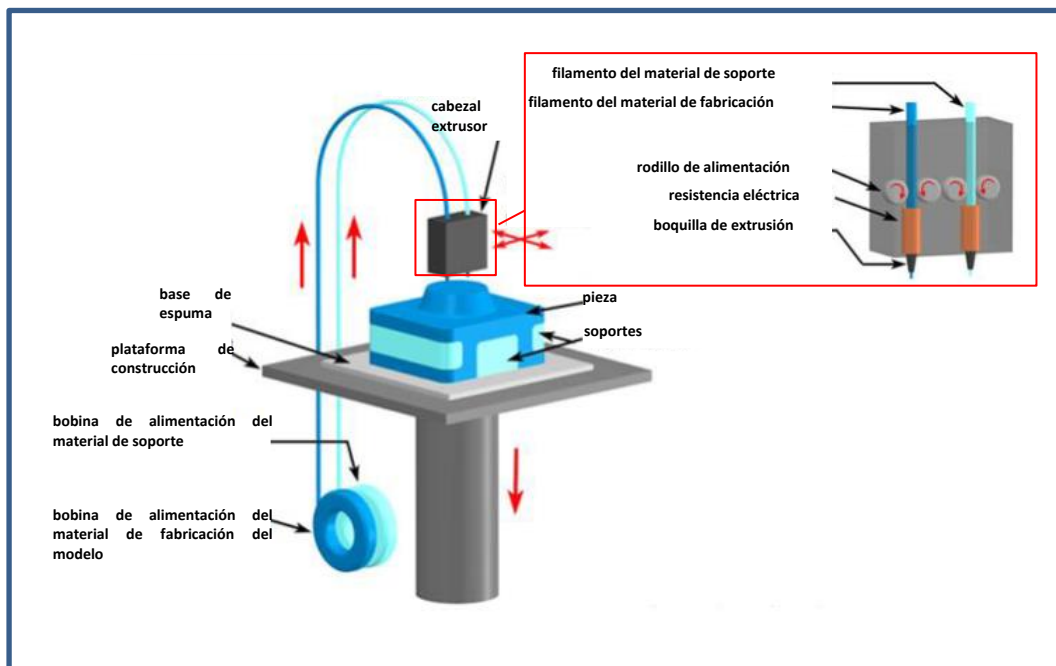


Fig. 86 La figura muestra el esquema de funcionamiento del MDF. ©ProtoFast.

Este sistema también se puede encontrar bajo las siglas PJP de Plastic Jet Printing, es decir impresión por chorro de plástico. Es un sistema con un funcionamiento comparable a la pistola de pegamento caliente en la que las barras de pegamento se calientan hasta fundir y son empujadas a través de una boquilla fina (Espinel, 2016, p.84), de modo que, a diferencia del anterior, no emplea tecnología láser. El MDF presenta una boquilla que se mueve en el plano X-Y horizontal depositando un hilo de material a 1°C por debajo de su punto de fusión. Tras su aplicación, el material solidifica inmediatamente sobre la capa precedente, adhiriéndose a esta. El hilo que se funde proviene de una bobina que alimenta el cabezal, calentando el filamento hasta fundirlo y controlando su salida sobre la superficie que va a ser construida gracias a un juego de rodillos alimentadores.

El cabezal se encuentra sobre una pieza metálica que se mueve en el plano XY dando forma al modelo a fabricar. En este caso es necesaria la creación de soportes, para lo que se emplea otro material fácil de remover empleando una boquilla adicional. Todos los sistemas que conforman el equipo cuentan con preciso control CNC, es decir, de los movimientos en los ejes X-Y del cabezal y en Z de la plataforma (Ardila, 2007).

Entre sus aplicaciones se destacan su empleo para la fabricación de prototipos creados para conceptualización y presentación. Dada la versatilidad que presentan los materiales de fabricación a la hora de ser pintados, lijados o perforados, el prototipo puede fácilmente convertirse en producto final (Infante, 2012).

3. 1. 3. 1. 3 Materiales en polvo

La **sinterización selectiva por láser** (conocida como SLS por su terminología en inglés Selective Láser Sintering), consiste en depositar una capa de polvo, de unas décimas de mm, en una plataforma dentro de una cuba que se encuentra a una temperatura aproximadamente de un grado inferior al punto de fusión del polvo. Un láser de CO₂ es reflejado mediante espejos sobre el polvo, sinterizándolo en los puntos seleccionados. El láser realiza el aporte de energía necesaria para fundir las partículas de polvo logrando que éstas se unan las unas a las otras (Infante, 2012).

El aporte de nuevas capas se realiza mediante un sistema de alimentación en el que un pistón impulsa el polvo a la superficie y un rodillo lo esparce uniformemente sobre la plataforma para formar la capa que será sintetizada, la plataforma entonces desciende y el proceso se repite hasta completar la pieza (Ardila, 2007).

El láser, de CO₂ y una potencia de salida de aproximadamente 60w, calienta el polvo justo por debajo del punto de ebullición (sinterizando) o por encima (fundiendo), por lo que las partículas del compuesto se fusionan con el fin de obtener el objeto sólido (Espinel, 2016, p.69). El haz láser va configurando así la geometría establecida por el programa de control, gracias a un sistema de espejos que lo conducen (Ardila, 2007).

Este sistema no necesita fabricar soportes que sustenten la pieza durante en el proceso de fabricación, puesto que la parte sinterizada se encuentra rodeada de polvo sin sinterizar que actúa de soporte (Espinel, 2016, p.70).

La pieza resultante es porosa; sin embargo, puede ser infiltrada con otro material. Por ejemplo, moldes sinterizados en acero posteriormente son infiltrados con cobre (Roig, 2006, pp.43 y 44).

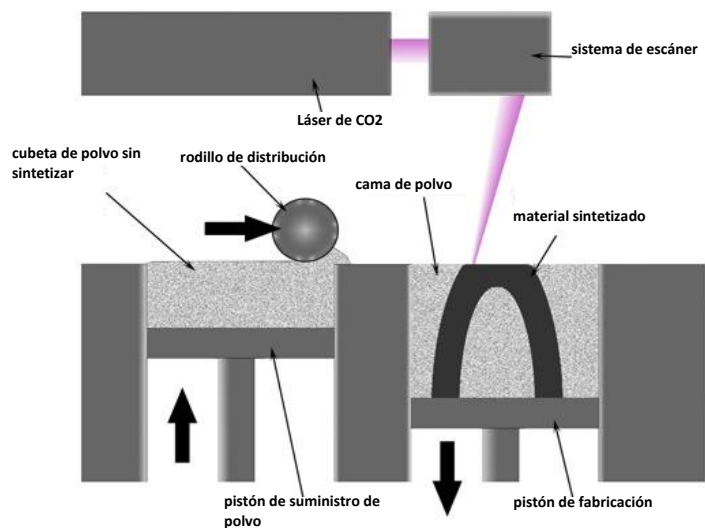


Fig. 87 En el esquema puede verse cómo funciona la técnica de sinterización selectiva por láser. ©Laser Prototypes Europe Ltd.

En los primeros desarrollos, la capa de polvo estaba constituida por poliamida, comercialmente conocida como nylon (Espinel, 2016, p.68). Se emplea esta técnica en la industria aeroespacial, automoción, consumo industrial, implantes dentales, herramientas quirúrgicas e instrumental médico.

Además, dentro de la sinterización selectiva por láser puede encontrarse clasificado o bien aparecer de forma independiente otro proceso, el sinterizado láser directo de metal (DMLS del inglés Direct Metal Láser Sintering). La técnica fue patentada en Alemania en 1994, aunque las primeras investigaciones comenzaron en los años 70. El proceso es exactamente igual que el SLS, pero mientras que el proceso SLS emplea como material de base el polvo de plástico, el DMLS utiliza el polvo de metal como el acero, el cobalto-cromo, el aluminio, el titanio o incluso el inconel³¹, siendo la resistencia de las piezas obtenidas comparable a las obtenidas mediante las técnicas de fundición o de mecanizado. El sistema de fabricación es realmente muy similar a las técnicas SLS convencionales: la plataforma en la que se realiza la impresión está compuesta de 2 recipientes, cada uno activado por un pistón. El primero se recubre con el polvo metálico mientras que el segundo se encuentra vacío y situado al nivel de la plataforma. La configuración de la pieza comienza añadiendo una fina capa de polvo, de una altura máxima determinada por el software de la impresora, en el recipiente vacío. El láser de fibra óptica fusiona el polvo metálico y una vez que la materia se consolida, una segunda capa de polvo es aplicada con la ayuda del sistema de pistones. El proceso se repite sucesivamente hasta la creación completa de la pieza. Esta tecnología es muy utilizada en la industria aeroespacial, automóvil y médica (para las piezas que se emplean como implantes dentales) y de forma general para el prototipado y la fabricación de

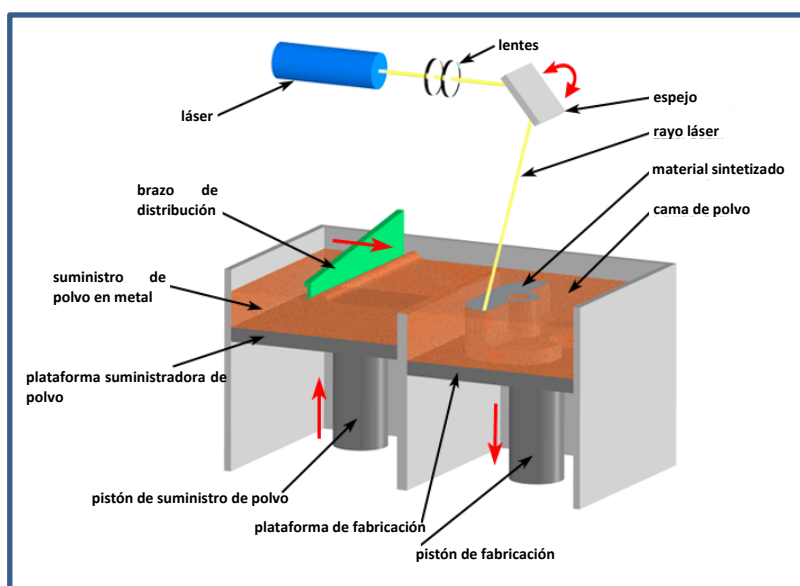


Fig. 88 Esquema del proceso de sinterizado directo de metal por láser. ©3D Natives.

herramientas (Sánchez, 2016).

³¹ El inconel es un acero de aleación de níquel resistente a la corrosión y a la oxidación, que es usado por su alta fuerza y muy buena resistencia a la corrosión acuosa. También recibe el nombre de Aleación 625 (Megamex, s.f.).

La **manufactura de partículas disparadas** (MPD), es anterior inclusive al desarrollo del modelado por deposición fundida. Los equipos constan de un cabezal X que cuenta con múltiples boquillas aspersoras que disparan pequeñas gotas de material fundido sobre la plataforma o a la capa anterior, de manera que estas solidifican y endurecen al impactar (Ardila, 2007).

De este modo, el prototipo es fabricado mediante la proyección de millones de partículas microscópicas de un polímero caliente, que al impactar se solidifica (Roig, 2006, pp.45 y 46).

Cabe destacar que el desarrollo y la ágil evolución de estas tecnologías posibilitaron la elaboración no solo de prototipos, sino de productos definitivos y terminados. Como se desarrolla a continuación, actualmente la manufactura por capas no solo es empleada en la industria, medicina y otros ámbitos anteriormente citados, sino que su desarrollo ha conseguido que numerosas tecnologías aparezcan y sean muy empleadas tanto en el ámbito artístico, como en la conservación.

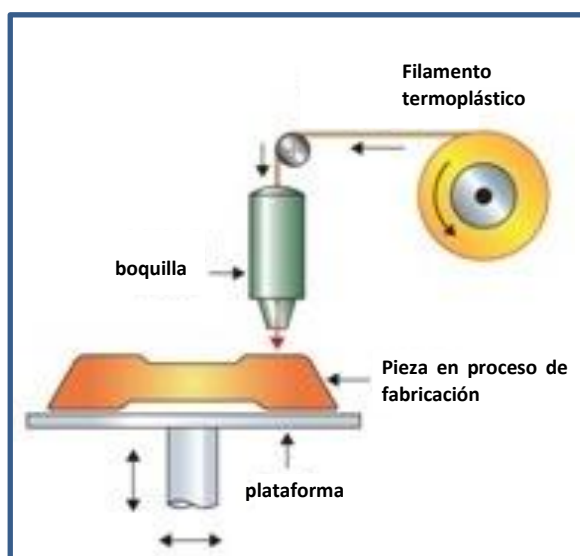


Fig. 1 Esquema de fabricación de manufactura de partículas disparadas. ©Kailey Truesdell.

3. 2 Sistemas empleados en la actualidad y las impresoras 3D

Una vez los orígenes de las maquinas herramientas y la FC, así como sus principales tecnologías han sido desarrolladas, se destacan a continuación, aquellas más empleadas en la actualidad. Además, su desarrollo y evolución ha derivado en la aparición de las conocidas impresoras 3D.

Sin embargo, debe esclarecerse que dentro de la FC puede hablarse de fabricación aditiva y de impresora 3D. La fabricación aditiva hace referencia a todas aquellas técnicas de fabricación por adición de un determinado material. Estas son empleadas con el objetivo de producir nuevos componentes complejos y durables. El concepto de fabricación aditiva suele emplearse en entornos industriales, profesionales o especializados y suele ser el concepto genérico para aludir al método de fabricación que consiste en añadir capas del material hasta conseguir la forma deseada. Por su parte, la impresión 3D, como heredera del PR, hace alusión a la fabricación de modelos o piezas finales de modo rápido pero limitado y, habitualmente se limita a un tipo concreto de tecnología aditiva. La impresión 3D se ha popularizado en los últimos años gracias a que las impresoras 3D son fáciles de usar y por lo general, suelen ser más económicas que otras tecnologías de fabricación aditiva lo que ha hecho que tenga una notable penetración entre particulares (Mizar, 2016).

3. 2. 1 Formatos de impresión y preparación del archivo

Todas estas tecnologías precisan de un archivo que imprimir, el cual debe ser convenientemente preparado antes de ser enviado a la máquina que va a materializarlo. Este archivo debe ser compatible con la tecnología que va a emplearlo, es decir, esta debe ser capaz de analizarlo e imprimirlo, enviando a la máquina las ordenes específicas para su fabricación.

El formato .stl fue creado para el primer proceso comercializado de estereolitografía, por eso se le llamó .stl. y constituye el método más sencillo de almacenar información acerca de objetos tridimensionales, por lo que es el formato estándar de transferencia de archivos DA (Ardila, 2007). Estos archivos no incluyen información de determinadas propiedades físicas que sí incluyen otros formatos DA, tales como el color y la textura; pueden crearse a partir de una nube de puntos o bien de un modelo DA y casi todos los softwares pueden realizar una exportación a dicho formato (R3ald, s.f.). Un archivo .stl contiene las coordenadas donde están los vértices que configuran el modelo que se desea imprimir, que viene determinado por caras triangulares (Espinel, 2016, p.61). De este modo, el archivo se obtiene convirtiendo las superficies del modelo en pequeños

triángulos, que deben ser de menor tamaño cuanto mayor sea la precisión requerida y, consecuentemente, mayor será el tamaño del archivo y el tiempo de pre-proceso. Actualmente, los programas DA disponen de este tipo de conversión automática (Roig, 2006, p.42) y la mayoría de programas y softwares 3D de modelado, creación de sólidos por ordenador, escáneres 3D y fotogrametría permiten la opción de exportar el archivo en diferentes formatos, entre los que se encuentra el .stl.

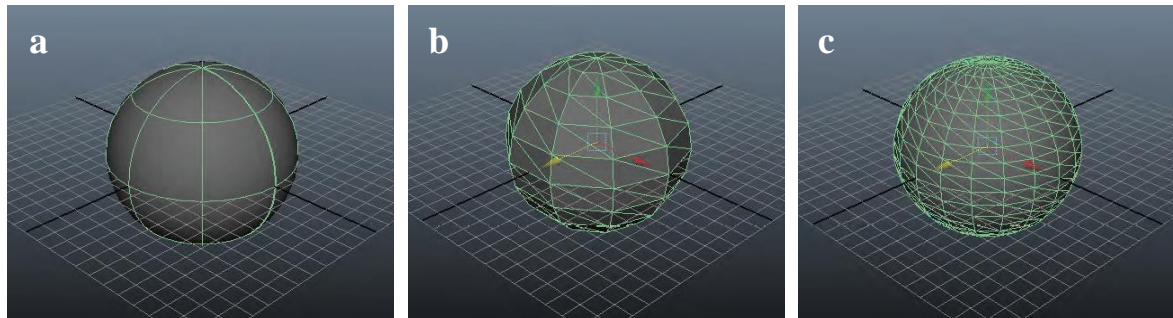


Fig. 90 En la secuencia de imágenes puede verse un archivo simple y curvado que va a ser transformado en .stl. La imagen a) muestra una esfera generada mediante curvas. No tiene planos y la superficie es curva, por lo que el modelo no se puede producir; en la b) aparece la misma esfera ya con caras triangulares en las que los planos son muy evidentes; en la c) aparece la misma esfera con más planos, a medida que mejora la resolución de las partes curvas, los planos y aristas son menos evidentes. ©José Carlos Espinel Velasco.



Fig. 91 En esta secuencia las imágenes muestran un modelo que ha sido mallado (de izquierda a derecha) con demasiada resolución, correctamente y con poca resolución. Puede verse la información referente al número de triángulos y como según este aumenta, lo hace también el peso del fichero. ©R3ald.

Sin embargo, hoy en día, las diferentes máquinas de prototipado admiten otros formatos disponibles que suelen ser .dae, .obj, .x3d, .x3db, .x3dv o .wrl. Una vez creado el archivo que va a ser impreso, el software de la impresora lo prepara para su producción. Generalmente este programa permitirá ajustar el tamaño de la pieza, la localización de la misma en el área de impresión y su orientación en relación a los ejes Y, X y Z (Espinel, 2016, p.62).

3. 2. 2 Máquinas herramienta y robots

Las máquinas herramientas han avanzado notablemente en los últimos años, de modo que los resultados obtenidos con su empleo satisfacen numerosas necesidades de muy diversos campos en la sociedad actual.

Una máquina herramienta muy empleada para la materialización de objetos patrimoniales es la fresadora. Tal y como ha sido descrito en apartados anteriores, las fresadoras elaboran el modelo devastando y eliminando el material sobrante de un bloque, configurando así el volumen de la pieza (Ávila, 2017, p.194). Las fresadoras pueden emplear diversos materiales como poliestireno expandido, fibras de madera prensadas y el poliuretano (Factum Arte, s.f.) y actualmente han desarrollado notablemente la técnica enfocada a la talla de ceras para joyería, consiguiendo gran nivel de detalle (Espinell, 2016, p.59). En cuanto a su uso en el ámbito de la conservación, tal y como será desarrollado en

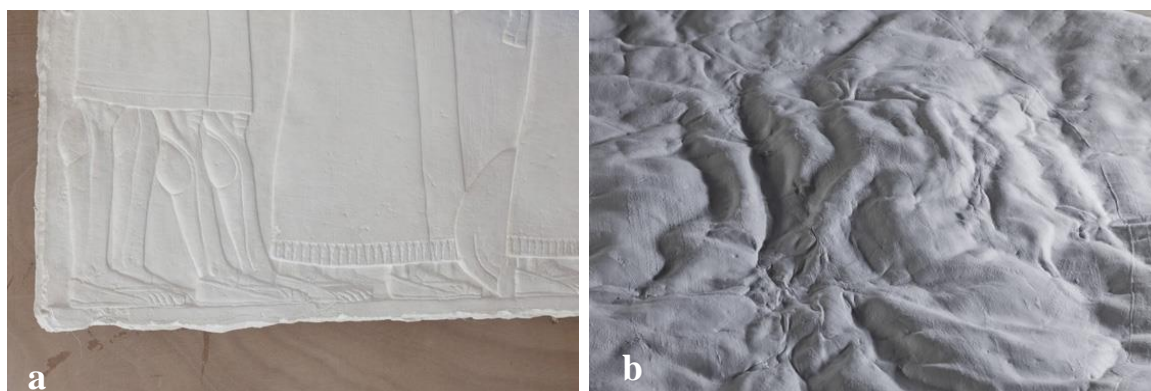


Fig. 92 A la izquierda (a) puede verse el detalle del fresado para la Reconstrucción del extremo oriental de la sala del Trono de Ashurnasirpal II; mientras que a la derecha (b) aparece el detalle del fresado del *Mapa Mundi de Hereford*. Ambos proyectos se desarrollarán más adelante en el capítulo 6. ©Factum Arte.

el capítulo 6, es muy empleada en la reproducción de facsímiles que tendrán diferentes funciones. Factum Arte es una empresa pionera de un novedoso método para fresar relieves en alta resolución. La fresa es aplicada a la conservación preventiva del patrimonio y a proyectos de diversos artistas, de modo que el fresado se ha convertido en su método de reproducción óptimo. La empresa ha fresado piezas en una amplia gama de materiales, como el poliuretano de alta y baja densidad, la madera, el alabastro, el aluminio, latón, bronce, escayola y antracita (Factum Arte, s.f.).

Los archivos 3D empleados a la hora de operar con fresadoras son archivos de corte 2D .dxf y archivos de fresado 3D .stl. Además, Factum Arte es pionera en el empleo de un novedoso método para fresar relieves en alta resolución a partir de archivos .tiff de 8 y 16 bits, gracias al innovador sistema de escaneado tridimensional Lucida (Factum Arte, s.f.).

Una máquina herramienta muy empleada para la reproducción de datos es, por sus grandes ventajas y versatilidad, la conocida como robot. Estas máquinas suelen estar constituidas por un brazo que puede moverse en los ejes X, Z, Y y una mesa rotatoria, que constituyen dos ejes más, aunque existen robots de 7 ejes. Trabajan eliminando materia, que puede ser todo tipo de materiales, piedra, madera, polímeros sintéticos, metales, etc. y, a diferencia de la fresadora, todos los ejes se encuentran coordinados, por lo que pueden realizarse esculturas en bulto redondo con ellos. En Factum Arte se trabaja con un robot de la empresa KUKA Robots IBÉRICA, S.A. que ofrece numerosos tipos de equipos para infinidad de aplicaciones (Kuka Robots Ibérica, s.f.).

En 2016 el artista Shezad Dawood trabajó con la empresa Factum Arte para crear dos bustos modelados en 3D con motivo de su exposición *Kalimpong*. Los bustos se fresaron primero en poliestireno con un robot Kuka de 7 ejes. Posteriormente los bloques se vaciaron en cemento, se pintaron de blanco y se acabaron con una capa de nieve artificial.

Por su parte el Instituto de Arquitectura Avanzada de Catalunya (IAAC) ha desarrollado una familia de tres pequeños robots conocidos como Minibuilders. Uno de los principales retos para traspasar la tecnología de impresión 3D a la arquitectura, ha sido el tema de la escala, puesto que el tamaño de las impresoras 3D limitaba la impresión de grandes estructuras arquitectónicas.



Fig. 93 Robot Kuka de 7 ejes de Factum Arte. ©Factum Arte.

Los tres Minibuilders trabajan en equipo por turnos, depositando un mármol artificial de fraguado rápido para construir la estructura: en primer lugar, el “robot base” construye las capas de base; posteriormente el “robot de sujeción” construye la cáscara restante de la estructura y, por último, el “robot de succión” recorre la cáscara, añadiendo capas de refuerzo donde sea necesario.

Cada robot se encuentra vinculado a sensores y un sistema de posicionamiento local, lo que permite al operador controlar su movimiento. Un robot de suministro adicional se encarga de suministrar a los tres robots con el material que precisan, siguiéndolos alrededor de la estructura cuando es necesario (Fundación Telefónica, 2017, p.15).



Fig. 94 A Robot desarrollado por el IAAC en colaboración con Joris Laarman Lab. Material, 2012. ©Fundación telefónica.

3. 2. 3 Manufactura por capas e impresoras 3D

La constante evolución de las técnicas de manufactura por capas, así como su combinación, ha supuesto la aparición de nuevos sistemas de impresión 3D.

Este avance tecnológico ha permitido que las ideas se materialicen en el campo de la ciencia. El uso de DA y FA permiten la fabricación de piezas empleando menos tiempo de lo que se empleaba años atrás. Por ejemplo, las impresiones 3D son una realidad que permiten a las empresas fabricar modelos sin necesidad de fabricar moldes para su inyección en plástico fundido. De este modo, se abaratan considerablemente los costos de diseño y fabricación de modelos, lo que se traduce en que el costo del producto final en el mercado puede reducirse cuantiosamente si antes se realiza el diseño de la pieza a nivel prototipo y después se genera el molde de ese producto para su fabricación en serie. Por ello, la necesidad de contar con una tecnología que permitiese modelar prototipos de bajo costo, con gran rapidez y precisión, dio lugar a la creación de la impresora 3D, tecnología

que permite una excelente herramienta que abre un abanico de posibilidades en la creación de modelos o prototipos, así como la mejora de diseños de los productos y su lanzamiento al mercado en un menor tiempo (Velásquez, 2011, pp.203 y 208).

Por su parte, José Carlos Espinel Velasco (2016) previamente citado en el capítulo anterior, desarrolla en su tesis las técnicas más empleadas en la actualidad en las impresoras 3D que en ocasiones combina diferentes técnicas entre sí, para la reproducción de datos escultóricos. Destaca el **Sinterizado Láser Selectivo**, la **Estereolitografía**, el **Modelado por Desposición Fundida** y la **Inyección de fotopolímero**:

La producción con SLS es ideal para piezas donde la complejidad geométrica hace que sea difícil de producir a través de procesos de fabricación tradicionales. Los objetos fabricados mediante SLS no necesitan de post-procesado, sin embargo, acepta una amplia gama de tratamientos posteriores para su patinado. Cuando las dimensiones del objeto a producir son mayores que las que la máquina permite, la solución es imprimir el objeto en varias partes y unirlos mediante un adhesivo, siendo muy empleados por sus óptimos resultados aquellos que basan su uso en resina epoxy (Espinel, 2016, p.74).

La empresa 3D Systems, Inc. constituye una de las mayores distribuidoras de impresoras 3D y es un referente en cuanto a las posibilidades que oferta en relación a su calidad-precio. Tal y como ha sido explicado en líneas anteriores, sinterizaba en un inicio nylon puro, con fibras de vidrio u otras fibras. Sin embargo, la tecnología ha evolucionado y ahora es posible sinterizar diferentes compuestos y muchos materiales de gran calidad, desde plásticos, cerámica y cristal hasta metal y otros materiales (3D Systems, Inc. s.f.).



Fig. 95 La imagen muestra diferentes impresoras SLS de la empresa 3D Systems, Inc. ©3D Systems, Inc.

La SLA, por su parte, emplea resinas fotopoliméricas, constituyendo este un mercado que ha crecido exponencialmente en los últimos años, por lo que los materiales para SLA son muy diversos en cuanto a propiedades mecánicas y tienen un gran número de diferentes aplicaciones. Existen incluso materiales biocompatibles que pueden ser empleados en diversas utilidades médicas. Es un sistema de producción de los más rápidos del mercado, a pesar de necesitar, como ya ha sido mencionado, el post-procesado una vez terminada la impresión. A su vez, las resinas presentan una gran resistencia mecánica y térmica.

Con el fin de simplificar el funcionamiento de esta tecnología, y basándose para ello en el proceso ya en desuso Solid Ground Curing, se ha desarrollado lo que se conoce como Micro Estereolitografía proyectada. En este sistema, el láser y los espejos son sustituidos por un proyector de luz UV encargado de proyectar cada capa sobre la placa cubierta de resina, funcionando como una máscara dinámica que solo deja pasar la luz a la parte que interesa curar en ese momento. El proceso se repite capa por capa hasta completar la pieza (Espinell, 2016, p.82).

La SLA permite la construcción de geometrías complejas que requieren precisión y prestaciones mecánicas específicas. Tal y como viene repitiéndose a lo largo de la presente tesis, la tecnología avanza a pasos agigantados y en la SLA pueden producirse piezas en resinas epóxicas foto sensibles en capas de 0.1mm y espesores mínimos de pared de 0.6mm; sin embargo, existe ya la SLA HD que reduce el espesor de las capas a 0.05mm, siendo posible espesores mínimos de pared de 0.3mm (Ec International Group, s.f.).

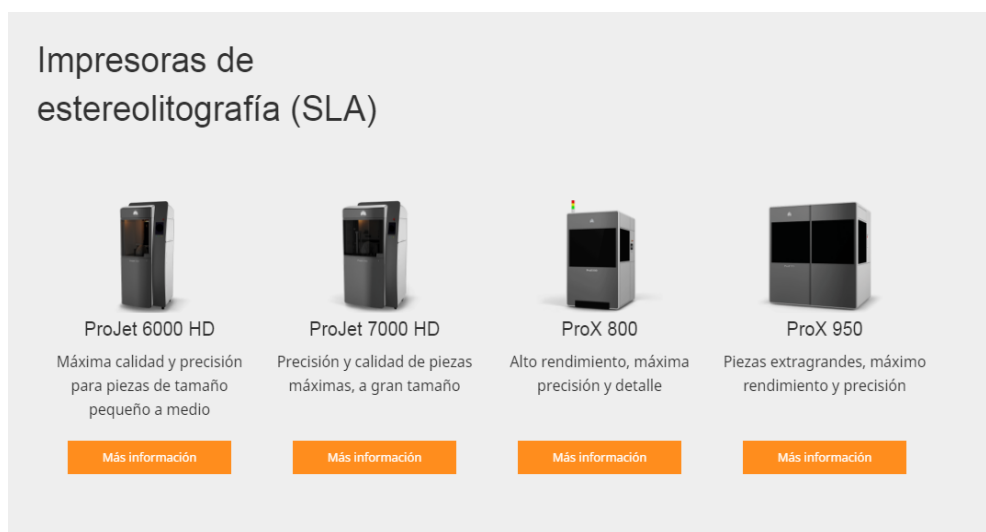


Fig. 96 La imagen muestra diferentes impresoras SLA de la empresa 3D Systems, Inc. ©3D Systems, Inc.

Las impresoras 3D también emplean el sistema de modelado por deposición fundida. Como ya ha sido comentado anteriormente, el fundador de Stratasys inventó la tecnología MDF hace ya más de 20 años, y la empresa ha continuado liderando la revolución de las impresoras 3D desde entonces. Estas tecnologías calientan el material termoplástico hasta convertirlo en semilíquido para depositarlo en gotas ultrafinas a lo largo de la trayectoria de extrusión. En casos en los que se precise un soporte, la impresora 3D deposita un material eliminable que hace las veces de andamiaje.

La empresa ha lanzado al mercado 3 series de diferentes impresoras MDF: Serie Idea, con la que se permite el desarrollo de ideas con modelos asequibles, puesto que las impresoras se adaptan al escritorio y al presupuesto; la serie Design, que perfecciona los diseños con piezas resistentes, duraderas y dimensionalmente estables que resisten las pruebas más exigentes; y la serie Production, que aporta agilidad y estética a todas las fases de desarrollo del producto con la mayor variedad de colores y propiedades de material para la fabricación de prototipos y herramientas (Stratasys, s.f.).

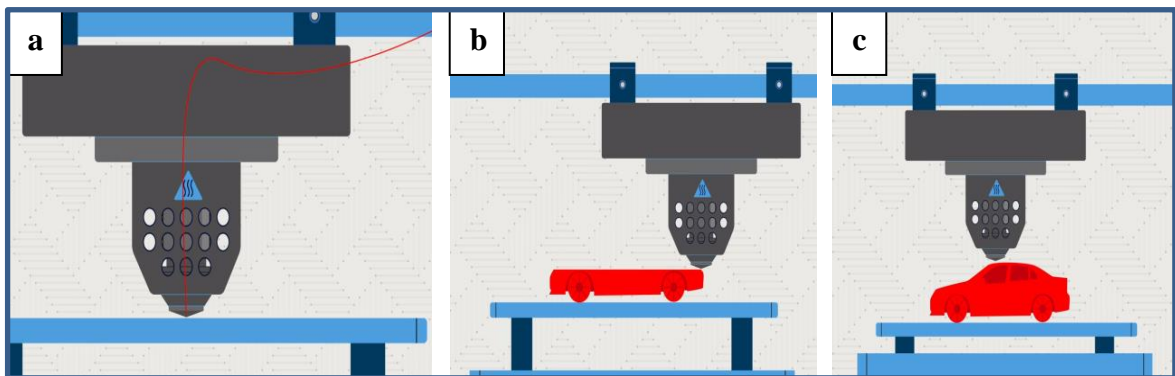


Fig. 97 Proceso de fabricación de un prototipo mediante una tecnología MDF de Stratasys. En la secuencia de imágenes aparece la tecnología y el filamento que será fundido (a); la mitad del modelo impreso (b) y el modelo terminado (c). ©Stratasys.

Como ya ha sido indicado, actualmente esta tecnología también se denomina FFF, por lo que es común que en las impresoras 3D aparezca FFF en lugar de MDF.

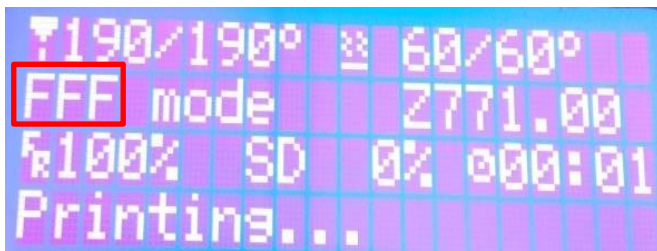


Fig. 98 Pantalla de la Impresora MDF Delta 40/70 del Laboratorio de Morfología Virtual (MNCN-CSIC). En ella aparece la información referente a la temperatura y al porcentaje que queda por imprimir, entre otras, y pueden observarse (destacadas en rojo) las letras FFF. ©María Ávila Rodríguez.

Por su parte la inyección de fotopolímero es el procedimiento que se conoce como impresión tridimensional (I3D), y comercialmente Z-Print.

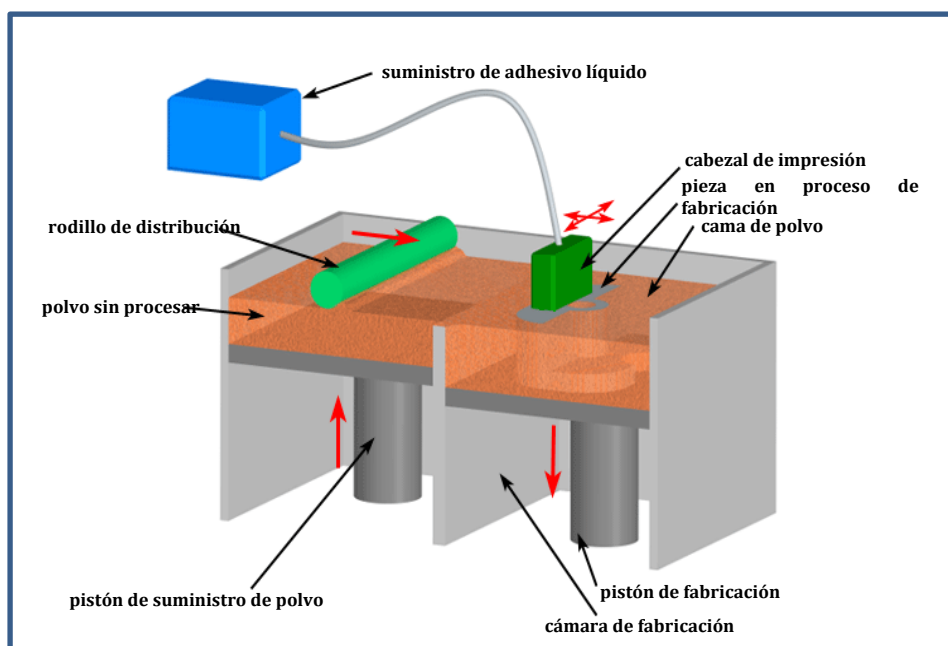


Fig. 99 Esquema de funcionamiento de la tecnología I3D. ©CustomPartNet.

Esta tecnología consiste en solidificar capas de un polvo mediante el uso de un aglutinante líquido que funciona a modo de pegamento. El proceso resulta de combinar las tecnologías SLS y la manufactura de partículas disparadas (Ardila, 2007).

El funcionamiento es básicamente como el de una impresora 2D de inyección de tinta, sin embargo, los cabezales se mueven sobre una capa fina de polvo y no sobre papel, inyectando el aglutinante con la forma de la capa correspondiente. Igual que en el resto de tecnologías, la plataforma va descendiendo capa por capa hasta completar el modelo. Todo el material que no es aglutinado funciona como soporte permitiéndose la fabricación de geometrías complejas sin necesidad de generar soportes ni estructuras extras. Cuando el proceso se ha completado se extrae manualmente la pieza y se recupera todo el material no aglutinado con el fin de poder utilizarlo en procesos posteriores. Además, se aplica aire a presión a la pieza para liberar todas las partículas que no han sido aglutinadas y eliminar el rastro de materia que pueda quedar en la pieza y que no forman parte del objeto. Con la pieza limpia, esta debe ser sumergida en un baño de cianoacrilato para proporcionarle mayor resistencia y conseguir que los colores, en caso de haberse aplicado color a la pieza, sean más brillantes (Espinel, 2016, pp.94 y 95).

Varios fabricantes han desarrollado diferentes dispositivos de impresión por chorro de tinta que utilizan la técnica básica descrita anteriormente. Las impresoras Model Maker (MM) de inyección de tinta de Solidscape Inc. utilizan un solo chorro para el material de construcción y otro para material de soporte (Ardila, 2007). De este modo, surgen las tecnologías conocidas más habitualmente por los nombres comerciales MultiJet Printing o Polyjet Printing (también Polyjet Modeling, Multijet Modeling, Polyjetting, Multijetting, Jetted Photopolymer). Polyjet, por ejemplo, es comercializada por la empresa Stratasys, mientras que Multijet lo es por 3D System, Inc. y el tipo de resinas utilizadas, así como el procedimiento son muy similares. Como todos los procesos de prototipado aditivo, los modelos se imprimen capa por capa. Cada capa de resina es curada por una lámpara de luz ultravioleta; así, cuando va a ser generada la siguiente capa, está ya ha endurecido y es lo suficientemente estable como para soportar la siguiente. Para las ceras no es necesario el proceso de curado, ya que estas se enfrían al contacto con la base de la plataforma de impresión o bien con la capa anterior, solidificando al instante (Espinel, 2016, pp.98 y 99).

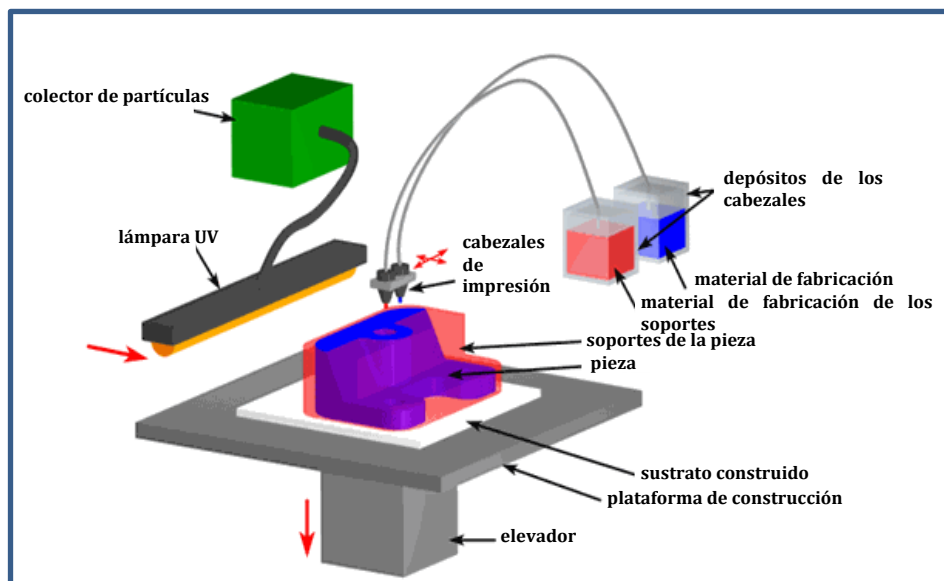


Fig. 100 Proceso de impresión mediante Multijet o PolyJet. ©CustomPartNet.

En este caso, las impresoras 3D trabajan comúnmente con materiales termoplásticos y cera. Cuando se imprimen, las gotas líquidas de estos materiales se enfrían instantáneamente y se solidifican para formar una capa de la pieza. Por esta razón, el proceso se refiere a menudo como la impresión de chorro de tinta de cambio de fase térmica. La impresión por inyección de tinta ofrece las ventajas de una excelente precisión y acabados superficiales (CustomPartNet, 2008).

PolyJet, de Stratasys, es actualmente una de las más potentes tecnologías de impresión 3D que permite la producción de piezas, prototipos y herramientas de acabado suave y gran precisión al imprimir con una precisión de hasta 0,1 mm, lo que se traduce en la posibilidad de producir paredes finas y geometrías complejas con la gama de materiales más amplia que cualquier tecnología pueda ofrecer. Estas impresoras, por tanto, imprimen y endurecen al instante mediante luz ultravioleta las gotitas de fotopolímero líquido. Sobre la bandeja se acumulan las capas y, si hay salientes o formas complejas que requieran soportes, la impresora inyecta otro material de soporte que se puede eliminar posteriormente de forma manual o con agua o bien mediante un baño de inmersión (Stratasys, s.f.).

En enero de 2017 el *III Salón del Cine y las Series* abrió sus puertas con un stand especial dedicado a la Impresión 3D multicolor y multimaterial, compartido por Integral 3D Printing, empresa proveedora de soluciones en Impresión 3D para la Industria 4.0, y por Estudios Durero, empresa líder en servicios de Artes Gráficas, que ha adquirido la única impresora 3D multicolor y multimaterial que existe en el mundo actualmente: la Stratasys J750 (Del Fresno, 2017).

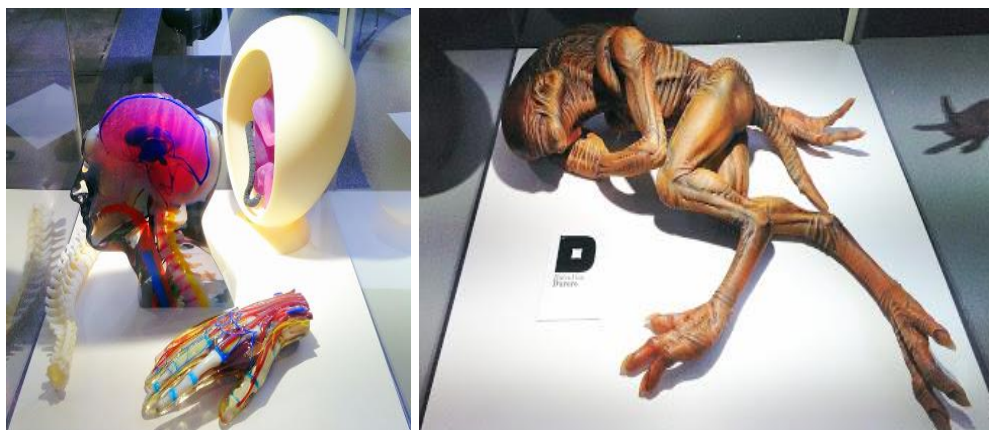


Fig. 101 Imágenes que muestran las impresiones 3D que se exhibieron en el stand. ©David del Fresno.

Esta permite imprimir más de 360.000 colores, con materiales rígidos y flexibles, con blanco y transparencias. La impresora es una máquina basada en tecnología Polyjet capaz de trabajar con hasta seis componentes diferentes y producir cientos de miles de colores. Permite la impresión de alta resolución, gran formato 490mmx390mmx200mm y un espesor de capa mínimo de 0,014mm, lo que le permite crear superficies totalmente homogéneas y detalles extremadamente finos (Estudios Durero, s.f.).

Son numerosas las empresas que ofrecen en el mercado diferentes tecnologías inject printing 3D.

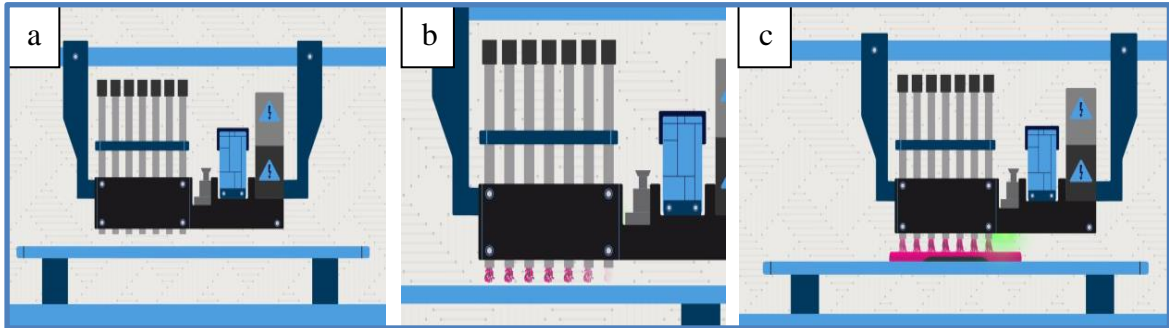


Fig. 102 Proceso de impresión con una tecnología Inject Printing 3D de Stratasys. En la secuencia de imágenes aparece: la tecnología que imprimirá el modelo (a); las diferentes boquillas comenzando a imprimir el material (b); y por último las boquillas imprimiendo y la luz ultravioleta (en verde) que solidifica la capa según esta es aplicada sobre la anterior (c). ©Stratasys.

Por ejemplo, Stratasys ofrece sus 3 series de impresoras 3D PolyJet, mencionadas en líneas anteriores (Stratasys, s.f.), y la empresa 3D System, Inc. por su parte desarrolló la tecnología de **Modelado con múltiple boquilla**, similar a la patente desarrollada por la empresa japonesa Brother Kogyo Kabushiki Kaisha®, llamada Inyección de fotopolímero (jetted photopolymer), en la que un equipo consta de un cabezal con varias boquillas spray que rocían diminutas gotas de resina fotosensible sobre la plataforma donde quedan expuestas a radiación UV formando la pieza capa por capa. En este caso se combinan las tecnologías SLA y la manufactura de partículas disparadas (Ardila, 2007).

3D Systems, Inc. implementó su tecnología (MJM) en sus máquinas Thermo Jet Modeler que utilizan varios centenares de boquillas para permitir tiempos de construcción más rápidos (CustomPartNet, 2008).

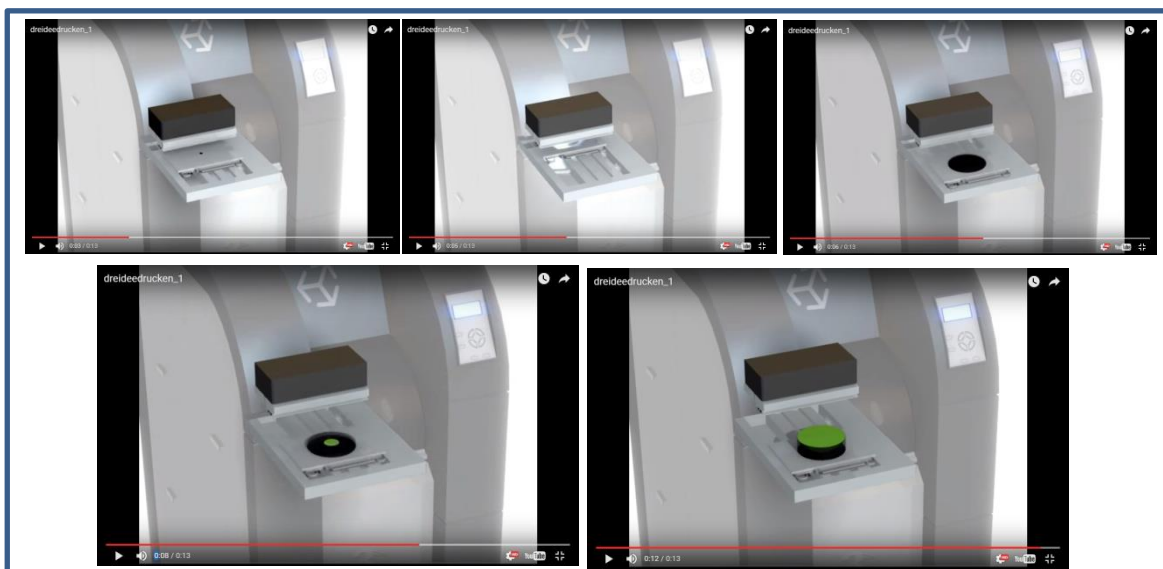


Fig. 103 La secuencia de imágenes muestra diferentes capturas de pantalla de un vídeo de 3DLabs que muestra el proceso de fabricación de un modelo mediante la tecnología MJM. La plataforma se mueve sin cesar de un lado a otro (siempre en el mismo eje) mientras las boquillas aplican el material líquido sobre la capa anterior que se expone al proceso UV para su solidificación. ©3DLabs.

Debe recordarse que, cuanto más finas sean las capas de la impresión, más fidelidad y capacidad de detalle tendrá la impresora, y en consecuencia, el objeto. Por ello de la resolución de las impresoras depende la fidelidad con la que el modelo se ha impreso con respecto al archivo 3D. El empleo de determinadas impresoras de baja resolución deriva, entre otros fallos, en la aparición de la estratificación en el modelo.

La empresa LEON3D facilita en su página web una guía de resolución de problemas que pueden surgir a la hora de utilizar impresoras 3D, entre los que se destaca: la falta de extrusión al inicio de la impresión, la no adhesión o bien adhesión incorrecta de la primera capa a la base caliente, la extrusión de poco o por el contrario de mucho plástico, la aparición de huecos en la cara superior de las impresiones, las piezas impresas con "hilos", ondulaciones en los laterales de la pieza o bien irregularidades, la falta de relleno en paredes finas, etc (Leon3D, s.f.). Aunque estos problemas parezcan muy complicados de resolver, generalmente leyendo sobre el fallo es sencillo encontrar solución sin necesidad de enviar la impresora al fabricante ni a reparación.

Como ha podido verse actualmente existe una gran variedad de estas impresoras en el mercado y estas presentan principalmente dos limitaciones, que tienen relación con el tamaño y el color de las piezas a reproducir. Las tecnologías de precios asequibles constituyen aparatos de reducido tamaño, siendo necesaria la impresión de los modelos (cuando estos superan el tamaño de la tecnología empleada) por partes. A su vez, dependiendo de las necesidades de los proyectos, suele ser común que el color no sea reproducido con la calidad necesaria para la realización, por ejemplo, de una reproducción, por lo que se imprimen las piezas monocromáticas y posteriormente se patinan o se vacían, con el objetivo de conseguir los acabados deseados. Tal es el caso de las piezas que van a tener un uso en el ámbito de la conservación o creación artística, que independientemente de la tecnología empleada para su materialización, las piezas obtenidas son vaciadas con los sistemas tradicionales de moldeo. Esto se debe a varios motivos, considerándose los más habituales: el monocromatismo que la mayoría de estos sistemas emplea sobre todo si son impresiones de alta definición; la común constitución de la pieza por diferentes piezas dependiendo de las técnicas y capacidad de las tecnologías empleadas; así como el empleo de materiales que no se consideran aptos para la constitución del facsímil.

Antes de finalizar este apartado, no pueden dejar de mencionarse los lápices 3D.

Peter Dilworth y Bogue Maxwell, de la compañía WobbleWorks, crearon en 2013 el 3Doodler, el primer lápiz de impresión 3D del mundo. Usando plástico ABS³², el lápiz permite dibujar en el aire o sobre superficies. Este es compacto, fácil de usar y no requiere ningún software ni equipo. Simplemente se conecta a una toma de corriente y en pocos minutos se puede empezar a dibujar cualquier cosa (Gómez, 2013).

El funcionamiento del lapicero es similar a la tecnología MDF, pero muy simplificada, puesto que el filamento que va a ser fundido se introduce por la parte superior del mismo. Para comenzar a usar el lápiz, este debe estar enchufado a la corriente y, tras unos minutos en los que se calienta el plástico en la parte interna, el material se va fundiendo y depositando a medida que el usuario aprieta un botón, realizando el dibujo y las formas de que desee. El plástico, al salir del lápiz, cambia su temperatura adaptándose a la temperatura ambiente, y solidifica rápidamente, permitiendo de este modo, realizar formas en el aire, y no solo sobre papel.

³² Acrilonitrilo Butadieno Estireno.

Tras el lanzamiento de 3Doodler, un año después la compañía Kickstarter lanzó al mercado el LIX 3D Printing Pen, una nueva generación de bolígrafo 3D (Trecool, 2014).

Aunque ya son varios los modelos que pueden encontrarse en el mercado (con precios muy bajos, entre 30 y 100 €), los lapiceros de las marcas 3Doodler y Lix son los más conocidos.

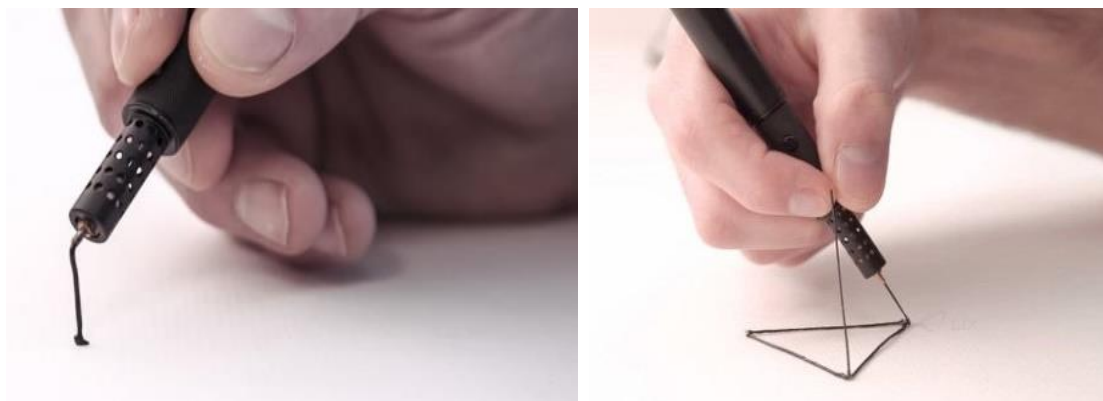


Fig. 104 La imagen de la izquierda muestra el lapicero comenzando a trabajar, mientras que a la derecha puede verse el modelo que va a ser creado más avanzado. En este caso es el lapicero de Lix. ©LixPen.

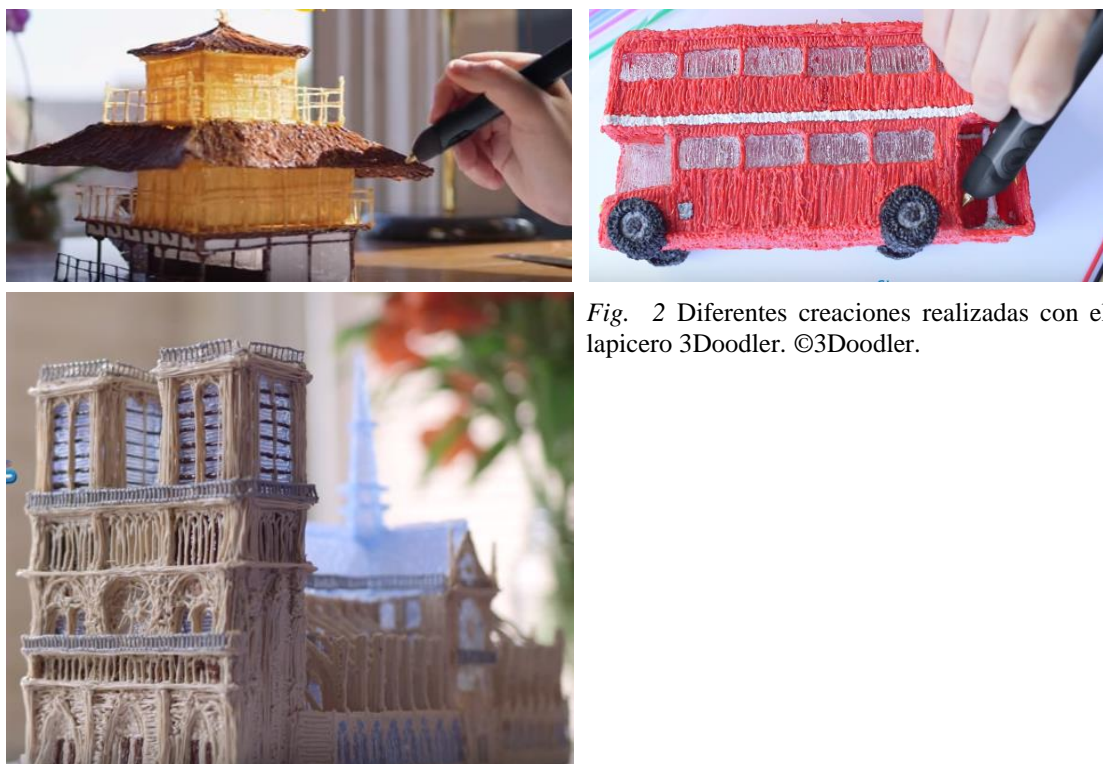


Fig. 2 Diferentes creaciones realizadas con el lapicero 3Doodler. ©3Doodler.



Fig. 106 Diferentes creaciones realizadas todas ellas con el lapicero Lixpen.
©Linpen.

3. 2. 3. 1 Materiales para la génesis del modelo 3D

Para que el lector se haga una idea aproximada de la cantidad de tecnologías y materiales que actualmente pueden encontrarse en el mercado, se cita como ejemplo la página web impresoras3D.com, que tiene como eslogan *everything to create*, es decir, todo para crear. En su página de inicio pueden verse las categorías que la empresa ofrece al consumidor, y en el apartado de filamentos de Impresora 3D, existen actualmente 596 elementos, lo que supone una amplísima oferta al usuario (Impresoras3D, s.f.).

Existe una gran variedad de materiales de impresión y el mercado del filamento termoplástico está en continuo desarrollo, por lo que constantemente surgen materiales nuevos.

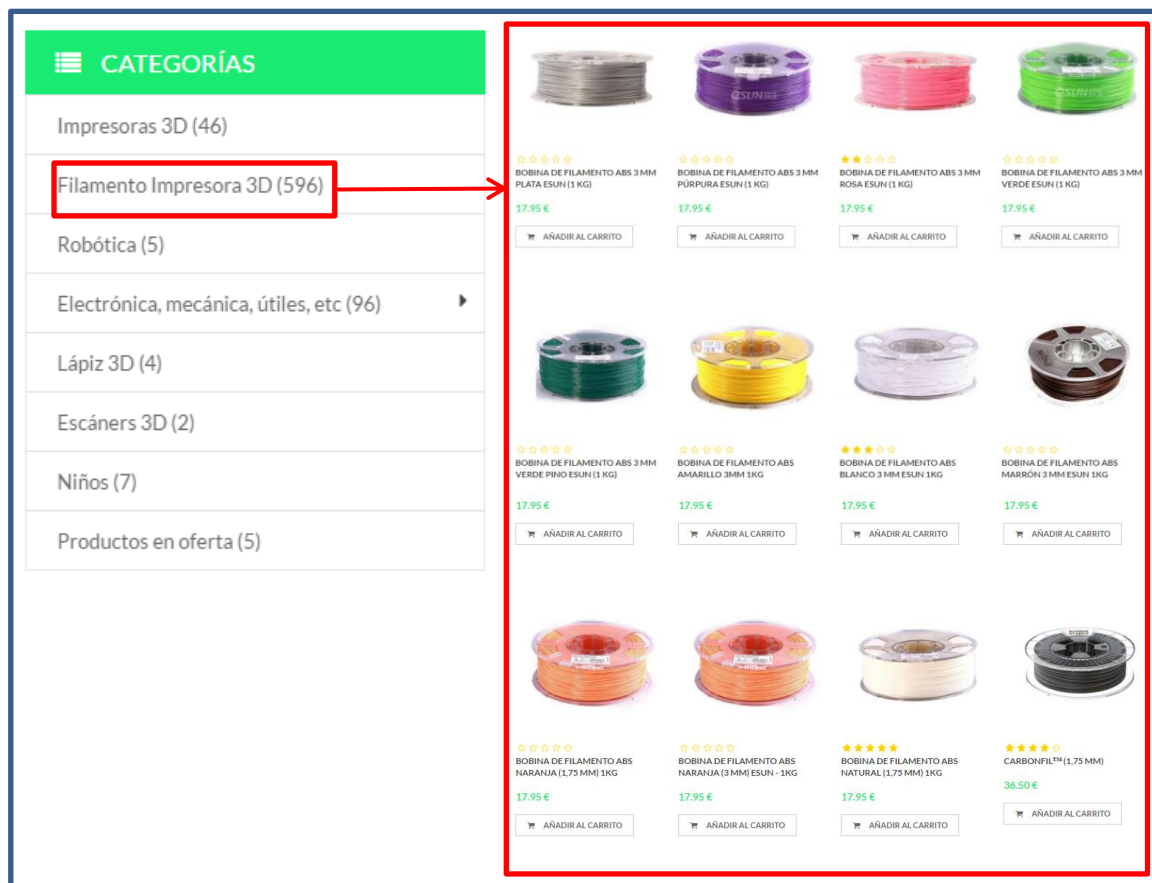


Fig. 107 Detalle de las categorías que la página impresoras3D.com ofrece. Destacado en rojo aparece el apartado en el que puede verse 596 filamentos de impresora 3D. A la derecha aparecen 12 materiales a modo de ejemplo. ©Impresoras3D.

Sin embargo, deben destacarse una serie de materiales por ser los más empleados y comunes en las impresiones 3D:

- **ABS:** como se ha indicado, el acrilonitrilo butadieno estireno es uno de los termoplásticos más usados en la impresión 3D. Es muy tenaz, duro y rígido, con resistencia química y a la abrasión; sin embargo, se degrada bajo la exposición a rayos UV y no es biodegradable. Es soluble en acetona y requiere que el cabezal que lo calienta alcance una temperatura de unos 240°C, mientras que la bandeja debe estar a 110°C.
- **PLA:** el ácido poliláctico es otro de los filamentos más empleados en la impresión 3D. Es biodegradable y suele obtenerse a partir de almidón de

maíz, de modo que al derretirse desprende un aroma que recuerda a comida y puede emplearse para recipientes de alimentos. La textura de las piezas no es tan suave como la lograda con ABS, sin embargo, las piezas son más brillantes y las esquinas se imprimen con mayor calidad. La temperatura necesaria para su impresión es de unos 210°C con la cama a unos 60°C.

Tanto el PLA como el ABS son los materiales más comunes en impresión 3D, sobre todo en las tecnologías MDF. Ambos pueden encontrarse en todo tipo de colores, desde el crudo natural, hasta dorados y plateados. Además, existen variedades de estos materiales con propiedades especiales como colores fosforescentes y fluorescentes, materiales que cambian de color según la temperatura y variedades flexibles o que conducen la electricidad. Daniel Burón publicó en 2013 un estudio de materiales con el título *Impresión 3D: qué materiales usar y dónde comprarlos*, en el que explica brevemente las características de los materiales más empleados en la impresión 3D (Burón, 2013).

- **HIPS:** el poliestireno de alto impacto es un material muy parecido al ABS, que requiere los mismos perfiles de temperaturas y se degrada bajo rayos UV. Suele emplearse como material de soporte que posteriormente se elimina con D-Limoneno.
- **PET:** el tereftalato de polietileno es uno de los materiales más usados para configurar botellas y otros envases. Genera piezas transparentes y es resistente a los impactos.
- **Laywoo-d3:** es un material que requiere condiciones de temperatura similares a las del PLA, con la peculiaridad de que, si se aumenta o disminuye unos grados, el color obtenido es más claro u oscuro. Tras enfriarse tiene textura parecida a la madera y las variaciones de temperatura dejan vetas más o menos oscuras.
- **Ninjaflex:** se trata de un revolucionario elastómero termoplástico (TPE) que permite crear piezas con una flexibilidad sorprendente. La temperatura de trabajo es muy parecida a la del PLA, con el cabezal a 215°C y la bandeja a 40°C.

- **Nylon:** su principal inconveniente es la falta de adhesión de la pieza a la bandeja, lo que genera numerosos fallos difíciles de controlar. Además, suele absorber fácilmente humedad, por lo que previamente a la impresión 3D debe secarse en el horno durante 3 o 4 horas. Sin embargo, presenta la ventaja de ser muy resistente a la temperatura, poco viscoso y existen distintas variedades que presenten flexibilidad, transparencia y otras cualidades.
- **PEEK:** nuevo material de reproducción para la tecnología SLS®, polímero apto para producir piezas de gran resistencia que ofrecen propiedades mecánicas mejores que el Nylon (Espinell, 2016, pp. 71 y 72).
- **PVOH:** alcohol polivinílico. Es también un plástico biodegradable que se emplea principalmente en tecnologías de extrusión como material de soporte, puesto que es perfecto para objetos complejos que necesitan una gran cantidad de apoyos. Opera con temperaturas de fusión que rondan los 180 °C y posteriormente se disuelve en agua, sin necesidad de emplear otros disolventes, por lo que es fácil de eliminar de la pieza (Llorca, 2015).

Por su parte, los sistemas Polyjet y Multijet emplean composiciones de diferentes resinas fotopoliméricas consistentes, en su mayoría, en diferentes porcentajes de acrilato de poliuretano, glicol de polipropileno y trietilenglicol dimetacrilato. Estos materiales se conocen con el término **composite**, en referencia precisamente a que son materiales compuestos por la suma de otros y dependiendo de los materiales y porcentajes mezclados, las cualidades mecánicas de las piezas varían, lo que hace que sea un proceso apto para todo tipo de industrias e ideal para la fabricación de prototipos mecánicos. Actualmente la gama de materiales fotopoliméricos es muy amplia y se pueden encontrar en casi cualquier color. Habitualmente, las impresoras permiten la combinación de hasta dos colores dentro del mismo material, (Espinell, 2016, pp.100 y 102), aunque como ya se ha indicado, actualmente existen impresoras que imprimen en una amplísima gama de colores.

Las **resinas fotopoliméricas** no solo se pueden tratar con pintura y aceptan numerosos tipos de tratamientos y posteriores procesos (cortar, pulir, taladrar...) sino que pueden ser usadas directamente para fundir. A pesar de la existencia de resinas específicas para fundición, existen otras más económicas con las que se pueden obtener muy buenos

resultados, con un nivel de detalle más que suficiente y con un coste realmente bajo frente al coste de las ceras de fundición preparadas para usar con estos procesos. Como ejemplo puede recordarse la pieza citada en el capítulo anterior Samuel 1, diseñada por Espinel y que posteriormente imprimió mediante el sistema Multijet en la resina Visijet Crystal, para fundirla después en una fundición en plata (Espinel, 2016, p.102).



Fig. 108 Medalla en plata, resultado de fundir la resina Visijet Crystal producida mediante el sistema Multijet. ©José Carlos Espinel Velasco.

Sin embargo, actualmente, el MDF es la tecnología que tiene el mayor número de materiales disponibles de los existentes en el mercado. Su única limitación consiste en que los materiales deben ser termoplásticos (Espinel, 2016, p.86).

Como puede verse, la industria y el marketing de la impresión 3D avanzan rápidamente. Son numerosos los complementos que el mercado ofrece al consumidor para trabajar con impresoras 3D.



Fig. 109 En la imagen puede observarse un kit de trabajo para impresiones 3D donde aparecen guantes, espátula, alicates, escalpelos, pegamentos... todo cuesta 99,90 € (gastos de envío no incluidos). ©Impresoras3D.

3. 2. 3. 2 Tratamientos post-impresión

Cuando las piezas se han impreso, suele ser necesaria la realización de tratamientos post-impresión.

En el blog Dima 3D Printers, Mario Ramírez Ferrero publicó, en 2015, 4 entradas tituladas *Tratamientos superficiales post-impresión*. En ella se desarrollan los tratamientos más empleados de post-impresiones 3D, destacando que con ellos se eliminan las rebabas y los restos de material no deseado que puedan haberse depositado en la pieza y se suavizan los acabados superficiales que resulten demasiado ásperos o rugosos. También existen casos en los que se busca mejorar la calidad dimensional de la pieza, en especial, de aquellas partes que requieran de unos ajustes más precisos. Por ejemplo, aquellas partes de piezas que van a estar en contacto con otras en caso de montajes multi-pieza. Si bien es cierto que muchos de estos tratamientos son inevitables, también lo es el hecho de que teniéndolos en cuenta ya desde el propio proceso de preparación del modelo 3D, estas operaciones se pueden minimizar.

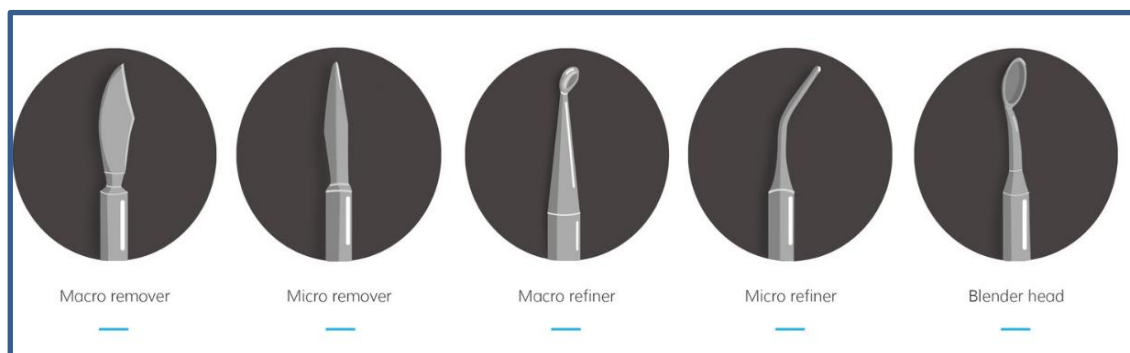


Fig. 110 La empresa Retouch 3D muestra en su página web la línea que ha lanzado de espátulas térmicas con cabezales intercambiables que sirven para retocar los detalles más finos de las piezas impresas en 3D en PLA, ABS y resinas. La espátula con los 5 cabezales que aparecen en la parte superior de la imagen cuestan 149,99\$. ©Retouch3D.

Entre los tratamientos posibles a aplicar, se pueden distinguir diferentes opciones, como pueden ser procedimientos manuales básicos, tales como el empleo de cuchillas, espátulas, lijas, limas, minipulidoras, etc; o bien tratamientos más avanzados en los que se han de emplear equipos especializados:

- Granallados y arenados. El granallado es un proceso que consiste en someter a las piezas a un chorro de pequeños trocitos de material, el cual se dispara mediante una pistola manual que funciona con aire a presión. Para las impresiones 3D suelen emplearse pequeños trocitos de termoplásticos de una dureza similar o ligeramente superior a la del material de la pieza. Otra posibilidad es el empleo de pequeñas esferas o microperlas de vidrio, bicarbonato de sodio o arenas especiales de diferente tamaño de grano y efecto abrasivo. Al impactar la granalla sobre la pieza, se logra un efecto progresivo de suavizado de la superficie que suele ir acompañado además de cierto endurecimiento y la eliminación de las rebabas y pequeños filamentos o trocitos de plástico que hayan podido quedar adheridos a la pieza de manera residual. El granallado permite localizar la aplicación del tratamiento en la zona deseada; sin embargo, requiere de un espacio cerrado y protegido para evitar que las partículas del chorro escapen al ambiente o puedan impactar contra el usuario.
- Pulido con abrasivos. Consiste en pulir la pieza por inmersión en un material abrasivo colocado en un recipiente vibratorio o rotatorio. Este material puede ser de diferentes tipos dependiendo del acabado deseado y, para ello, se utilizan arenas especiales como la piedra pómez, trozos de



Fig. 111 Pistola de granallado con microperlas. © Lindsey Frick.



Fig. 112 Detalle de tratamiento de pulido con abrasivos por vibración. ©Laura Griffiths.

cerámicas, de vidrios o termoplásticos, que en ocasiones se acompañan de líquidos que sirven como lubricantes y/o para retener el polvo que se genere. El roce de estos con la pieza va desgastando y/o compactando progresivamente toda la superficie de la misma en un efecto similar al granallado. Este tratamiento se aplica a toda la pieza de un modo bastante homogéneo, por lo que no puede controlarse como en el granallado.

En cualquier caso, ambos tratamientos pueden resultar muy agresivos y, por ello, las zonas sobre las que no interesa intervenir, como pueden ser las esquinas, para evitar su redondeo o los pequeños detalles, para evitar en definitiva la pérdida de definición, suelen ser encintadas previamente al tratamiento para protegerlas.

- Mecanizados. Otros posibles tratamientos mecánicos son todos aquellos análogos a los que se realizan en los procesos de fabricación por mecanizado o eliminación de material, taladrados, torneados, fresados, etc. Se aplican generalmente en piezas metálicas. En el caso de los termoplásticos, apenas se aplican los mecanizados, puesto que el calentamiento que originan provoca la fusión del material lo que conlleva a su deformación (Ramírez, 2015a).
- Tratamientos térmicos. Los tratamientos térmicos que se pueden aplicar sobre una impresión 3D en general van a estar dedicados a tareas como: retirar partes sobrantes de una pieza, por ejemplo, soportes de impresión auxiliares; a intentar corregir la presencia de posibles fallos en la impresión; a mejorar los acabados superficiales; o bien a realizar la unión de las diferentes partes que compondrán una pieza final. Los tratamientos pueden realizarse por calentamiento directo sobre el material de la pieza, empleando, entre otras opciones, decapadores para pintura de aire caliente, secadores del pelo, soldadores de estaño, planchas o bien las herramientas de retoque para impresiones 3D que ya existen en el mercado. También puede realizarse un aporte de material fundido extra a la pieza, empleando equipos relativamente costosos y especializados, por lo que su uso queda reservado en la práctica a usuarios avanzados y entornos industriales (Ramírez, 2015b).

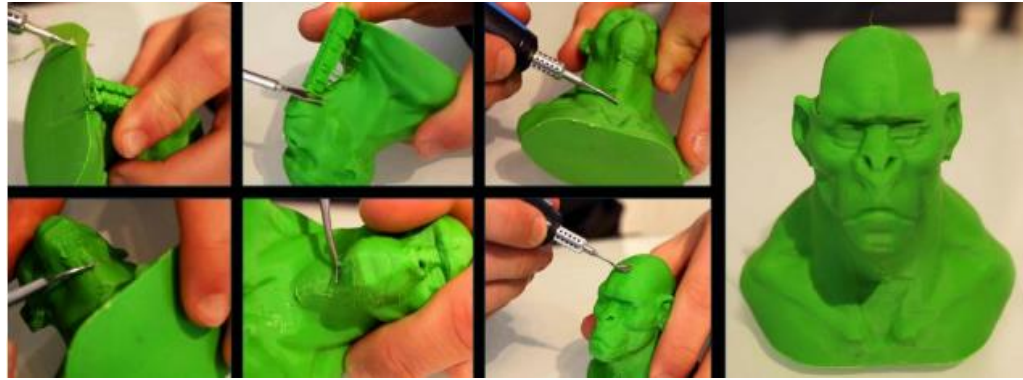


Fig. 113 Retoque mediante espátula térmica específica para impresión 3D. ©Retouch 3D.

- Tratamientos químicos. Consisten mayoritariamente en someter la pieza a la acción de una sustancia determinada, generalmente un disolvente líquido capaz de interaccionar con el material empleado para construir la pieza, ya sea por inmersión directa en el fluido o introduciendo la pieza en un recipiente cerrado donde se vaporiza el disolvente. Van a estar dedicados, principalmente, a mejorar los acabados superficiales de las piezas y, en algunos casos, a realizar la unión de las partes que compondrán la pieza final. El tratamiento puede producirse por inmersión directa de la pieza en el fluido disolvente o bien con aplicación directa del disolvente, por ejemplo, empleando aplicadores específicos en los que el usuario controla la zona sobre la que se quiere actuar, al contrario que en la inmersión, en la que el disolvente actúa en toda la pieza. Para el ABS el disolvente más empleado es la acetona mientras que el PLA debe emplear disolventes industriales más peligrosos y cancerígenos como el

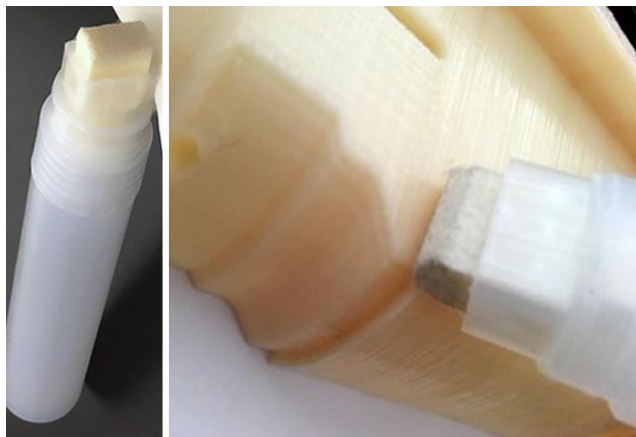


Fig. 114 Stick para la aplicación directa de acetona. ©Mario Ramírez Ferrero.

tetrahidrofurano, el acetato de etilo, la butanona, el cloroformo (CHCl_3), etc (Ramírez, 2015c). También existe la posibilidad de emplear un tratamiento químico por inmersión en atmosfera de vapor de un disolvente (Ramírez, 2015d).

3. 3 Aplicación de las impresoras 3D en los diferentes ámbitos de la vida diaria del ser humano

Como puede comprobarse, las impresoras 3D que, como se ha indicado, basan su tecnología fundamentalmente en las técnicas de manufactura rápida, continuamente están en desarrollo. Numerosos son los campos y ámbitos donde han encontrado aplicación. Actualmente ejemplificar casos del empleo de estas tecnologías en la sociedad podría constituir sin duda alguna, en sí mismo, otra tesis dedicada únicamente a este tema, por lo que se han destacado algunas de sus aplicaciones principales, siendo conscientes de que los casos son incontables.

La importantísima empresa Airbus S.A.S. ha revolucionado el modo de fabricar en aeronáutica buscando obtener construcciones ligeras para aviones civiles. Tradicionalmente los componentes constituían piezas de aluminio fresadas en fresadoras 3D, sin embargo, actualmente son piezas impresas de titanio con una reducción de peso superior al 30% (Fundación Telefónica, 2017, p.12).

Por otro lado, para ilustrar un ejemplo de cómo la industria reduce los costes implementando la tecnología 3D en su cadena de trabajo, se cita la empresa francesa fabricante de ascensores SODIMAS®, que compite con multinacionales como Otis o Schindler S.A. Gracias a la impresión 3D, la empresa ha conseguido un ahorro en costes de producción del 98% tan sólo en su fase de prototipado. Según su directora técnica, la impresión 3D se ha convertido en una parte imprescindible en la cadena de diseño de la empresa, ya que permite perfeccionar las piezas con antelación de forma rápida y muy rentable, que es exactamente lo que les está permitiendo ser más competitivos en el mercado (Impresiontresde, 2016).

El ámbito de la arquitectura también se está viendo influenciado por las impresoras 3D. La impresión de viviendas es ya una realidad, puesto que pueden habitarse casas impresas en 3D en materiales plásticos que se asemejan a las maquetas que se imprimen en arquitectura para definir los proyectos; otras se fabrican con bloques impresos de cemento y otros materiales característicos de la construcción tradicional; algunas están construidas a

base de adobe y fibras vegetales. En ocasiones, se imprimen de una sola pieza de gran tamaño y en otras se ensamblan pequeños bloques preimpresos.

A principios de 2015 se construyó en China un edificio de cinco pisos totalmente impreso en 3D, con una mezcla de cemento y residuos industriales, lo que implica el reciclaje de residuos como hormigón, fibra de vidrio, arena y otros restos de obra. A mediados del mismo año, la empresa China Winsur sorprendió con el ensamble de una casa de dos pisos que previamente se habían impreso. El tiempo de ensamble de los seis módulos que componen la vivienda, el proceso completo de impresión, incluyendo los muebles y las escaleras, fue de 72 horas. La misma empresa desde 2014 fabrica en pocas horas con la técnica de MDF espacios que puede tener destino de vivienda o de oficina (Trimaker, 2017a).



Fig. 115 Edificios impresos en 3D. A la izquierda el edificio de cinco plantas construido en 2015 y a la derecha la casa de dos pisos. ©Trimaker.

Por su parte, en Alcobendas, Madrid, se ha construido el primer puente peatonal del mundo impreso en 3D en hormigón. Se trata de un puente peatonal que mide 12 m de largo y 1,75 m de ancho y fue inaugurado a finales del 2016 (Trimaker, 2017b).

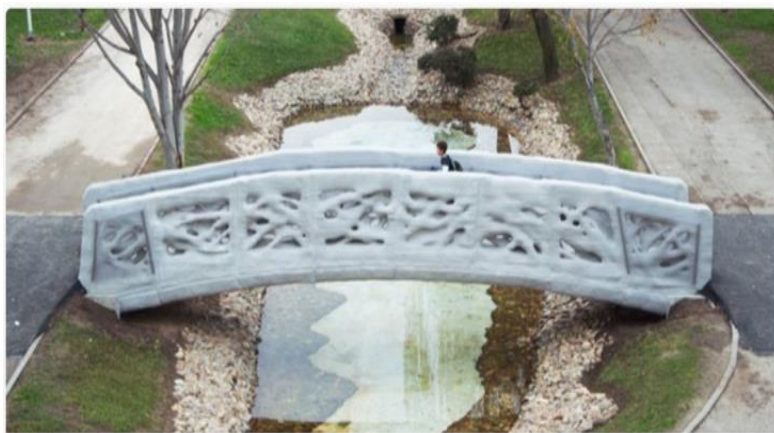


Fig. 116 Puente impreso. ©Trimaker.

El campo de la medicina acumula avances en los que la impresiones 3D son las protagonistas, por lo que se citan algunos de los más comunes y algunos de los más novedosos, que aún hoy cuesta creer puedan ser reales.

Los audífonos comenzaron a imprimirse en 1998, de modo que el 98% de los audífonos existentes en la actualidad se han fabricado usando impresión 3D. La contribución de la impresión 3D a la industria dental ha aumentado la calidad de las piezas (implantes, fundas dentales, puentes, y una gran variedad de aplicaciones dentales) y acelera la producción. En 2013 un paciente en EEUU se sometió a una cirugía radical, en la cual el 75% de su cráneo fue sustituido por un implante impreso en 3D realizado en un material biocompatible y semejante al hueso. El año anterior, una mujer de 83 años recibió el primer implante de mandíbula de titanio fabricado con una impresora 3D. Las prótesis también pueden ser impresas, por lo que la ortopedia avanza hacia una mayor velocidad en los procesos productivos y la disminución de los costes. Se está trabajando también en la fabricación de una oreja biónica, es decir, totalmente artificial, consistente en dispositivos electrónicos alojados en una estructura biónica. La impresión 3D ha permitido también que un grupo de la Universidad escocesa Heriot Watt produzca racimos de células madre mediante impresión basada en válvulas. Por otra parte, investigadores de la Universidad de Pensilvania y el Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT) han descubierto un modo de imprimir vasos sanguíneos, usando azúcar como “tinta” en una impresora mientras que cuatro estudiantes de la Universidad de Leiden (Holanda) han desarrollado un proceso apoyado en la impresora 3D y la tecnología de células madre inducidas ya mencionada. En 2011 se mostró un experimento en el cual se imprimía un prototipo de riñón humano, capaz de producir una sustancia semejante a la orina, por lo que ya se está trabajando con diferentes tipos de tejidos: vejiga, cartílago, tráquea, corazón, etc (Impresiontresde, 2013).

Tal importancia en la producción de múltiples tipos de objetos presenta las impresoras 3D en la actualidad, que la Fundación Telefónica organizó una muestra en Madrid desde el 15 de junio al 22 de octubre del 2017 que giraba en torno a la tecnología de impresión tridimensional y su impacto en disciplinas tan variadas como la medicina, moda, la gastronomía o arquitectura. La muestra lleva por nombre *3D Imprimir el Mundo* (Fundación Telefónica, 2017).

Por último, no puede dejar de mencionarse el sin fin de posibilidades que surgen con la impresión 3D en el ámbito del embalaje. El embalaje por impresión 3D permite la realización de todo tipo de embalajes para cualquier sector y ha cambiado la manera de diseñar y producir los embalajes puesto que presentan numerosas y diversas ventajas. El proceso de impresión 3D utilizado para la realización de embalajes por la empresa RSD Soluciones Integrales de Ingeniería es el proceso Pack&Strat® que permite realizar embalajes de manera rápida y automática a través de archivos digitales del o de los objetos a embalar. Trabajan, entre otras muchas, a partir de la definición del volumen de embalaje, el posicionamiento del objeto en el embalaje, la elección de los materiales para la realización de las capas para el interior del embalaje, la elección del tipo de caja exterior y medida de la caja, etc...De este modo se obtienen embalajes interiores totalmente a medida y personalizables que garantizan la protección del objeto. Este proceso Pack&Strat® nacido gracias a la tecnología 3D, abre un mundo de alternativas en la realización de embalajes (Rsd, 2017).



Fig. 117 Ejemplos de embalajes realizados con Pack&Strat®, a la izquierda para el sector del arte y a la derecha para el sector de la vidriería. Ambos son objetos frágiles que precisan ser debidamente embalados para sus traslados o simplemente almacenados. ©Rds.

**PARTE II- APLICACIÓN DE LA
TECNOLOGÍA 3D A LAS TÉCNICAS DE
DOCUMENTACIÓN, CONSERVACIÓN Y
RESTAURACIÓN DE BIENES CULTURALES**

Capítulo 4. Documentación 3D del patrimonio: bases de datos y sistemas de monitorización

La documentación de los bienes culturales constituye una parte primordial de la conservación del patrimonio cultural. Una documentación rigurosa puede convertirse, con el paso del tiempo, en el principal medio por el cual investigadores y el público en general contemplen un bien documentado que desde entonces haya cambiado radicalmente o incluso desaparecido (Santana, 2014, p.3).

Las tecnologías 3D han impactado directamente en estas tareas de salvaguarda del patrimonio, mejorando y evolucionando a un ritmo vertiginoso.

Actualmente, las nuevas tecnologías abren la puerta a estudios y análisis métricos más completos y exhaustivos en 3D (Cabrelles, Lerma, Navarro y Seguí, 2013, p.85), por lo que en el ámbito de la conservación se está descubriendo la importancia de obtener registros digitales en alta resolución; a la par que la importancia de integrarlos en los protocolos de actuación profesionales. La documentación 3D obtenida puede almacenarse en forma de base de datos, junto con la evaluación del grado y tipo de riesgos a los que una obra se expone. Además, los datos obtenidos son esenciales para la conservación del objeto, ya que con el registro se crea una referencia muy precisa que permite la detección de alteraciones, debido a que la sucesión de imágenes obtenidas por medio de la digitalización permite la atenta supervisión de los bienes culturales. Esta información se presenta esencial para investigadores y conservadores, quienes realmente son capaces de interpretarlos, ya que numerosos daños pueden ser revelados sin necesidad de realizar otro tipo de pruebas que impliquen la toma de muestras, o incluso el desplazamiento de la obra para la realización de otro tipo de estudios, como las radiografías (Ávila, 2017, pp.194 y 195).

Los modelos 3D permiten así documentar el patrimonio con gran precisión. En el caso de la arqueología, es muy destacable que la documentación gráfica se presenta fundamental para su comprensión e interpretación, puesto que esta representa el medio más adecuado para explicar y comunicar la complejidad de la arqueología y los contextos que la describen (Campana, 2014, p.8).

Tal y como se ha indicado y se verá a lo largo del presente capítulo, la información contenido en los modelos 3D es realmente relevante en caso de ocurrir destrucción o alteraciones de cualquier tipo en la estructura de la obra, por lo que es fundamental que la información existente sea fielmente documentada. De este modo, los investigadores podrían llegar a tener acceso a esta información, más completa, si está bien tomada, a la que puede aportar la fotografía, y sin necesidad de observar la obra *in situ*.

4. 1 Documentación

Documentación es la ciencia que, por medio de las técnicas denominadas documentales, tales como coleccionar, ordenar, clasificar, seleccionar, recuperar y difundir; tiene como objetivo dar accesibilidad al contenido de las fuentes de conocimiento. Con la documentación de una pieza se garantiza su conservación y defensa, justificándose los inventarios y catálogos como instrumentos para la conservación y custodia del patrimonio de los museos. En este punto es fundamental hacer referencia a los inventarios, instrumento de descripción y recuperación en un orden numérico de la información que ha sido documentada. Por su parte el catálogo constituye un instrumento de recuperación de la información según la clasificación preestablecida con el inventariado (Bravo, 1997, p.92).

Robin Letellier (2017) en su libro *Recording, Documentation, and Information Management for the Conservation of Heritage Places, Guiding principle* define la documentación como el stock de información ya existente. Afirma que, como actividad, representa la recolección y archivado de registros sistemáticos con el fin de preservarlos para futuras referencias, puesto que “el registro de hoy es la documentación de mañana”. (p.15)

Desde la prehistoria, el ser humano ha representado el medio del que formaba parte y ello sirve hoy en día al investigador como fuente de documentación de ese entorno y modo de vida (Angás, 2011, p.156). Por ello la importancia de producir adecuadamente registros de todas las intervenciones realizadas sobre el patrimonio, no sólo como obligación ética para la posteridad, sino porque también implica beneficios inmediatos en términos de planificación de proyectos, comunicación interdisciplinaria, así como la evaluación de los resultados. Como requisito previo para la conservación, el registro es una responsabilidad de los profesionales involucrados en los procesos de conservación del patrimonio. Los registros generados deben preservarse y ponerse a disposición de los demás por lo que los datos consignados deben describir en detalle la configuración física y dimensional de un objeto, puesto que pueden resultar fundamentales en caso de pérdida³³ y servirán como referencia al equipo de conservación cuando tengan que lidiar con el desarrollo o investigación de un proyecto de conservación (Letellier, 2007, p.15).

La documentación constituye actualmente una de las funciones más importantes de los museos. De hecho, éstos pueden ser considerados como “centros de documentación” del patrimonio. Son, por tanto, organismos clave en los orígenes de la documentación, así como en su regularización y normalización (Mecd, s.f. b).

La importancia de documentar correctamente el patrimonio radica también en el hecho objetivo (a la par que conocido por una gran mayoría de los profesionales del arte) de que existieron (existen y desgraciadamente, existirán) casos en los que se han llevado a cabo actividades de conservación, que, además, han modificado aspectos de la obra, sin dejar documentación adecuada. Por ello, para estos casos, solo la disponibilidad de imágenes históricas es la única manera de estudiar y reconstruir el pasado (Bitellia, Girellia, Marzialib & Zanuttaa, 2007, p.1).

Timothy P. Whalen (2007, p.12), director del Instituto de Conservación Getty, afirma que las labores de registro, documentación y gestión de la información de los sitios patrimoniales culturales no solo deben ser tareas intrínsecas a todo proyecto de conservación, si no que esta actividad debe además continuar mucho después de que la intervención se haya completado. Es la base de la monitorización, gestión y mantenimiento

³³ Este punto será más adelante desarrollado en un próximo apartado.

rutinario de los sitios, contribuyendo a la transmisión del conocimiento referente a lugares patrimoniales para futuras generaciones.

Tal y como exigía la Carta de Venecia³⁴ (1964): “Los trabajos de conservación, de restauración y de excavación estarán siempre acompañados por una documentación precisa, constituida por informes analíticos y críticos ilustrados con dibujos y fotografías”. (Art. 16)

De este modo, la importancia del fichaje y catalogación de piezas museísticas nació prácticamente al originarse los museos, determinándose así continuos cambios en los modelos a utilizar con el fin de realizar del mejor modo posible el proceso descriptivo. Estos cambios fueron propiciados por los propios museólogos, que se preocupaban de conseguir un modelo cada vez más adecuado a sus propósitos. En 1942 aparecieron, en respuesta al por entonces vigente Reglamento de Museos Arqueológicos de 1901, unas instrucciones donde se ordenaba la redacción de los catálogos documentales de museos. Ya por aquel entonces se hacía alusión a las divergencias surgidas del método de trabajo y el deseo de los conservadores por conseguir normativas unificadas y precisas (Barraca, 1994, p.136).

Puesto que hoy en día no se concibe una catalogación del p sin la elaboración previa de una documentación que implica cada vez más el empleo de técnicas 3D que representen tridimensionalmente los estados actuales y permitan recreaciones virtuales con una infografía³⁵ científicamente fidedigna (Baceiredo Rodríguez, V. y Baceiredo Rodríguez D., 2011, p.131), es importante aclarar la definición aportada por el documento Los Principios de Sevilla³⁶ sobre la recreación virtual. El documento afirma que:

³⁴ La carta de Venecia será más adelante, en el capítulo 8, desarrollada.

³⁵ Se conoce como infografía la técnica de elaboración de imágenes mediante computadora (Rae, s.f.). Más adelante en el capítulo 7 serán desarrolladas con más detalle.

³⁶ Los Principios de Sevilla nacen en 2011 en el marco de la SEAV (Sociedad Española de Arqueología Virtual) y del Forum Internacional de Arqueología Virtual. Antes de ello debemos retrotraernos a la Carta de Londres, encuentro con el objetivo de normalizar las visualizaciones 3D del patrimonio Cultural bajo los principios de comunidad disciplinar, sostenibilidad, transparencia o metodología estandarizada entre otros. Así los Principios de Sevilla nacen para aplicar los principios de la Carta de Londres al patrimonio Arqueológico, definiendo a la Arqueología virtual como aquella que “tiene por objeto la investigación y el desarrollo de formas de aplicación de la visualización asistida por ordenador a la gestión integral del patrimonio arqueológico”. Todo esto será más adelante desarrollado en el capítulo 8.

La recreación virtual comprende el intento de recuperación visual, a partir de un modelo virtual, del pasado en un momento determinado de un sitio arqueológico, incluyendo cultura material (patrimonio mueble e inmueble), entorno, paisaje, usos, y en general significación cultural (Principios de Sevilla, 2011).

Las recreaciones virtuales tratan, por tanto, de imitar, simular o reproducir un modelo mediante elementos virtuales 3D.

En España, desde 1993, el Ministerio de Cultura junto con la Dirección de Museos ha trabajado en la sistematización de las normas documentales, tanto en lo relativo a la catalogación y tratamiento técnico-administrativo de los fondos museográficos, como al establecimiento de terminologías para la clasificación, denominación y descripción de diversos tipos de ítems (Abella, 2012). Es fundamental destacar la aplicación informática DOMUS, sistema integrado de documentación y gestión museográfica desarrollado por el Ministerio de Cultura. Se trata de una aplicación para el catálogo y gestión de los fondos museográficos y documentales de los museos, que surge a partir del informe de 1996 *Normalización Documental de Museos: elementos para una aplicación informática de gestión museográfica*, del Ministerio de Cultura. El documento recogía la necesidad de construir un sistema informatizado de documentación que facilitase un modelo normalizado de estructuras de información para el inventario y catalogación de fondos museográficos y documentales, así como un mecanismo automatizado de los procesos de gestión que los museos realizan en el ejercicio de las funciones que tienen encomendadas (Ministerio de Cultura, s.f.).

Hasta los años 90, el soporte tradicional y más empleado para la documentación seguía siendo el papel, pudiéndose afirmar que prácticamente todos los catálogos documentales estaban realizados en este material. El uso del papel conllevaba dos inconvenientes, por un lado, su conservación y, por otro, su cantidad, que hacía difícil su almacenaje. A partir de entonces, el empleo del papel fue paulatinamente desapareciendo y se generalizaron los nuevos soportes como los discos, cintas de grabación, películas y, sobre todo, la informática, que fue incorporada al mundo de la cultura (Barraca, 1994, p.149). No cabe duda de que actualmente la totalidad de los museos españoles documentan sus fondos de un modo informatizado, dada las numerosas ventajas que supone.

En la actualidad, en España, el IPCE, Instituto del Patrimonio Cultural de España, Subdirección General adscrita a la Dirección General de Bellas Artes y Archivos del Ministerio de Cultura, desarrolla diversas funciones, entre las que cabría destacar: la elaboración y ejecución de planes para la conservación y restauración de los bienes culturales constitutivos del patrimonio español; el establecimiento de líneas de investigación, criterios, métodos y técnicas de conservación y restauración de dicho patrimonio; el archivo de la documentación generada por cada intervención y la difusión y divulgación de todas sus actividades. Implícita en sus labores está la documentación de los bienes a conservar y restaurar; para ello, cuenta con varios departamentos, uno de ellos es el gabinete de fotogrametría desde 1984 y otro el equipo de delineación, en los que se documentan algunos de los bienes que son restaurados por el Instituto o en colaboración con otros organismos autonómicos, estatales e internacionales (Lodeiro, 2011, p.8-10).

Un ejemplo importante y anecdótico que ilustra la importancia de que los bienes sean catalogados correctamente constituye el robo ocurrido en el Museo Provincial de La Coruña. En septiembre de 1985, fueron robadas *La Aurora* y *Dédalo y el Minotauro*, tablas de Rubens (Barraca, 1994, p.140). Tres meses después de la desaparición, se descubre el rastro de las tablas en Estocolmo: un pintor sueco pretendía venderlas después de haberlo intentado en varias galerías de arte nórdicas. La INTERPOL incautó días después *Dédalo y el Minotauro* en Nueva York, donde sus poseedores ilegítimos pretendían autentificarla. En 1987, un tribunal sueco condenó a dos años de prisión al poseedor del cuadro y ordenó su devolución a España, pero un recurso de la defensa logró una posterior sentencia que dejaba en la calle y con la tabla al receptor ilegal, gracias a una diferencia de un centímetro entre las medidas del cuadro y su descripción, así como a causa también de unos errores en la traducción al sueco del informe pericial del Museo del Prado. Tres años después del robo, el Tribunal Supremo sueco confirmaba la sentencia original y en 1990 la tabla *Dédalo y el Minotauro* fue devuelta al Museo de La Coruña. *La Aurora* llegó a España en 1992 y fue depositada en el Museo Arqueológico de Madrid (Pereiro, 1992).

No cabe duda de que una correcta catalogación es imprescindible puesto que, tal y como se ha constatado en el ejemplo, no solo constituye una documentación de la obra fundamental, sino que también es el “documento de identidad” de una obra, que servirá para certificar sus características en caso que así sea necesario.

De este modo la Red Digital de Museos Españoles es un proyecto del Ministerio de Cultura que tiene como objetivo poner a disposición pública en internet un catálogo colectivo de los bienes culturales de los museos, tanto de los de titularidad estatal y gestión exclusiva de la Dirección General de Bellas Artes y Bienes Culturales y de Archivos y Bibliotecas, como de los de titularidad estatal y gestión transferida a las comunidades autónomas o de los museos de otras titularidades que estén interesados en formar parte de este catálogo. Toda la información, que será accesible a través de este catálogo colectivo, procederá del Sistema Integrado de Documentación y Gestión Museográfica *Domus* (Mecd, s.f. a).

Así, la necesidad de una adecuada documentación de las colecciones y de una normalización de las prácticas museísticas que permita compartir recursos, así como aprovechar las numerosas ventajas que las tecnologías de la información y comunicación brindan, impulsó la colaboración entre organismos internacionales y nacionales para el avance del campo de la documentación (Abella, 2012). Organismos y asociaciones internacionales que han de ser citados por su importancia en el tema del presente capítulo son: el ICOM (Internacional Council of Museums) y dentro de este el CIDOC (International Committee for Documentation), dedicado a la documentación de las colecciones de museos reúne a conservadores, bibliotecarios y especialistas de la documentación, del registro, de la gestión de las colecciones y de la informatización (Cidoc, s.f.).

La Asociación MDA, Museum Documentation Association de Inglaterra se creó a finales de los años setenta con sede en Cambridge (Marín, 1999, p.146); según la tendencia anglosajona, la documentación e información museográfica se incluye como proceso que tiene que ver con la gestión de las colecciones en los museos, dentro del término "Collections Management". Este término incluye ante todo la conservación y la documentación de los objetos de los museos y la información asociada a ellos surgió en la

década de los años setenta en Estados Unidos expandiéndose hacia el área británica (Marín, 1999, p.142).

Por su parte, no pueden dejar de ser mencionadas las labores de documentación desempeñadas por el GCI, Getty Conservation Institute. Desde sus primeros días, el GCI ha incluido tareas de registro, documentación y gestión de la información del patrimonio cultural (Whalen, 2007, p.7).

Por lo que a Latinoamérica respecta, uno de los centros de documentación más importantes es el Centro de Documentación de Bienes Patrimoniales (CDBP) de Chile, organismo gubernamental cuya razón de ser es contribuir al desarrollo de políticas de documentación para los museos de Chile (Cdbp, s.f.).

Recientemente el CIDOC del ICOM ha señalado que la documentación en los museos está ligada al desarrollo y uso de la información de los objetos que componen sus colecciones, así como con los procedimientos que apoyan su gestión. Esta información debe estar registrada en forma escrita y/o digital en un sistema de documentación que sea accesible para el equipo del museo, los investigadores y para el público en general (Cdbp, s.f.).

De este modo la documentación de un museo comprende las funciones de registro, inventario, control de movimientos y catalogación. La conservación de una pieza en un museo sólo puede ser justificada conservando conjuntamente la documentación que memoriza las condiciones en que fue hallada y su historia. En caso contrario, los museos se convierten en simples almacenes de objetos por lo que la documentación de un museo es toda la información que el centro posee respecto a los bienes que custodia (Abella, 2012).

La documentación de bienes culturales es, por tanto, una labor compleja que tiene como objetivo la gestión de la colección, precisa de tiempo y raramente puede finalizarse puesto que es una actividad constante que implica la revisión de esa información y por lo tanto el incremento de esta misma en el soporte apropiado (Nagel, s.f., p.8).

No puede negarse que la documentación y digitalización del patrimonio es un hecho imparable e indispensable; sin embargo, exige unas responsabilidades, puesto que no es un mero trámite, sino que constituye una evidencia del objeto documentado. Con la digitalización y la documentación, el objeto se preserva a lo largo del tiempo, por lo que debe ser fiel a este (Pereira, 2012a).

Por tanto, además de ayudar a preservar los bienes documentados, la documentación siempre debe constituir la fase previa a cualquier investigación científica. Mediante esta labor es posible captar el estado de un bien en el momento en el que se realiza dicha documentación, por lo que es fundamental asegurar su adecuada realización.

Así, considerando una vez más que el patrimonio cultural material tiende de manera constante a degradarse, a pesar de que las actuales técnicas de conservación retrasen el proceso, es fundamental entender que esto no siempre es posible por diversos factores (Grande, 2013, p.16). Por ello la documentación constituye una fase imprescindible en la conservación del patrimonio, que debe aplicarse a todas las fases de cada investigación y no exclusivamente a los resultados obtenidos con el fin de conseguir una trazabilidad en dichos resultados, permitiendo futuras investigaciones y estudios (Koroso, 2013, p.200).

4. 1. 1 Tipos de documentación

La propia heterogeneidad del concepto patrimonio conlleva la amplísima diversificación de los métodos y técnicas destinados para su propia documentación. Es por ello el campo o disciplina más difícil de llevar a cabo debido a la gran cantidad de variables que intervienen en su configuración (Angás, 2011, p.155). Según el tipo de patrimonio que se ha de documentar: inmueble, mueble, arqueológico, inmaterial, paisajes, industrial o documental; las técnicas de representación gráfica variarán, aunque generalmente estas se realizan mediante fotografía, imágenes panorámicas, vídeos inmersivos o tecnología 3D (Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico, s.f.). Lo importante y fundamental siempre es conseguir un registro exhaustivo para generar una documentación detallada (Baceiredo Rodríguez, V. y Baceiredo Rodríguez D., 2011, p.132).

4. 1. 1. 1 Documentación gráfica del patrimonio cultural

Ya a finales del s. XVIII la figura de Albrecht Meydenbauer, padre de la fotogrametría actual, anteriormente citado en el capítulo 1, dedicó su vida a promover que la fotografía constituyese una estrategia para la preservación de inmuebles y monumentos al posibilitar que estos fuesen reconstruidos en un futuro gracias a la fotografía. Sin embargo, habrá que esperar a los años 70 para que la UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) establezca el inventariado del patrimonio nacional de un país como estrategia indispensable en las tareas de protección del patrimonio histórico, lo que significa que la documentación constituye una herramienta fundamental para su preservación (Pereira, 2012b).

Las imágenes digitales bidimensionales han constituido uno de los métodos principales para visualizar y crear archivos digitales con fines de investigación. Esto ha venido determinado por el hecho de que las imágenes son un modo rápido, sencillo y económico de documentar, conservar y diseminar bienes almacenados en museos u otras instalaciones de almacenamiento remoto (Galeazzi, di Giuseppantonio & Matthews, 2015, p.3).

De este modo las fotografías aumentaban notablemente la cantidad de información documentada con respecto a ilustraciones y son consideradas descripciones mucho más objetivas, sin embargo, no siempre son adecuados para mostrar determinados detalles, como, por ejemplo, las sutilezas entre las diferencias del terreno. A pesar de sus deficiencias, las fotografías han llegado a considerarse un apoyo fundamental en las tareas de documentación, adaptándose siempre a las limitaciones de la tecnología disponible en cada momento (Reilly, 1990, p.133).

Tal y como afirma el Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico (Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico, s.f.): “Las imágenes sobre nuestros bienes patrimoniales constituyen una fuente de información imprescindible para su protección, gestión, investigación y difusión”. Las representaciones gráficas, por tanto, aportan valor añadido a la información textual de modo que constituyen por sí mismas una forma de documentar sus valores.

Es por ello que desde hace algunos años crece por parte de los profesionales del sector de la conservación y divulgación del patrimonio una inquietud por los aspectos referentes a su documentación gráfica (Pereira, 2012b).

El empleo de imágenes con el fin de documentar el patrimonio cultural es una constante en las tareas de conservación y restauración del mismo.

José Manuel Lodeiro Pérez (2011), ingeniero técnico del IPCE, establece una diferenciación entre la documentación métrica y la no métrica. La documentación no métrica fundamentalmente se emplea tanto a nivel divulgativo y didáctico como en museos, donde se incluyen modelos 3D, representaciones virtuales de una pieza o fotografía 360.

Por su parte, la documentación métrica llevada a cabo en el IPCE es fundamentalmente aquella que permite definir métricamente el bien, lo que implica definir su geometría en un momento determinado. Para ello obtienen plantas, alzados, secciones, perfiles, modelos inalámbricos 3D, modelos virtuales, etc. En este registro pueden reflejarse deformaciones y/o deterioros que se aprecian en el objeto de documentación. Sobre la documentación métrica obtenida se trazan los mapas de daños, procesos de restauración, etc. Y también pueden emplearse como base a traslados de edificios (anastilosis), etc. En todos estos proyectos es fundamental el conocimiento de la forma y la geometría, así como sus dimensiones con precisión, por lo que los documentos obtenidos están todos ellos dotados de metricidad (Lodeiro, 2011, p.10).

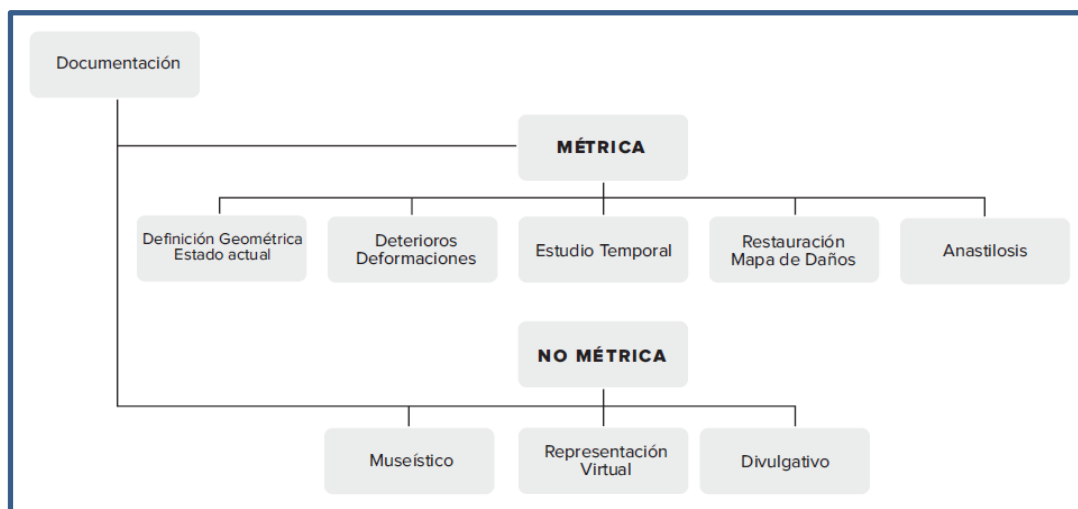


Fig. 118 Esquema de usos. ©José Manuel Lodeiro Pérez.

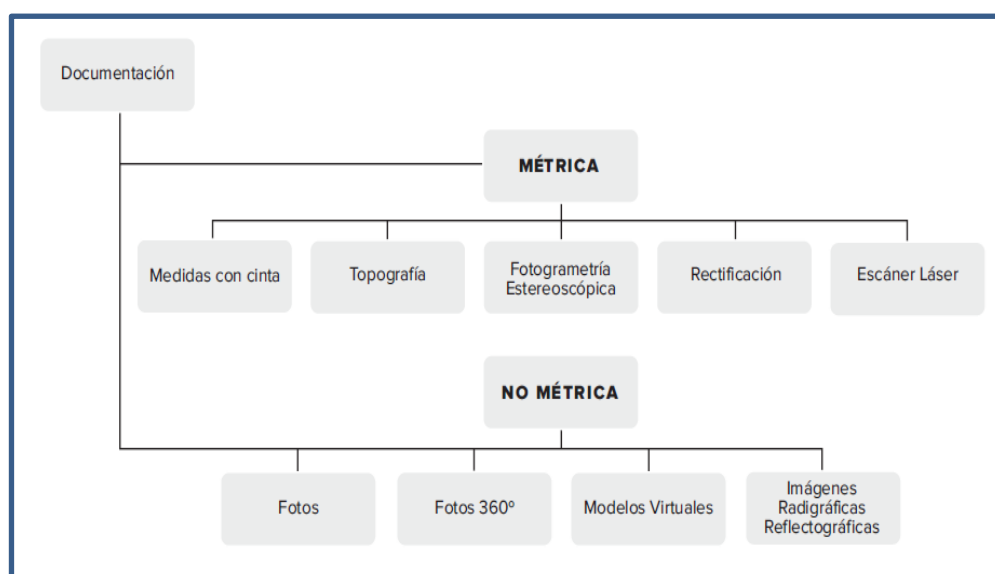


Fig. 119 Esquema de métodos. ©José Manuel Lodeiro Pérez.

De este modo, en el IPCE (Lodeiro, 2011, pp.12-17) las técnicas más empleadas a la hora de documentar métricamente son:

- La medición con cinta métrica: método más empleado para la obtención de plantas, útil en muchos trabajos de documentación. Para evitar los errores se combina con la topografía para obtener los puntos fundamentales que conforman el armazón general del edificio.
- La propia topografía: permite documentar cualquier objeto mediante un número finito de puntos, obteniéndose una buena aproximación a su geometría real. Se obtienen curvas de nivel, secciones, alzados, plantas, etc. Con el fin de conseguir una mayor definición, se finalizan los detalles mediante medición con cinta.
- La fotogrametría estereoscópica: permite documentar con toda precisión desde objetos pequeños a conjuntos monumentales.
- Las técnicas de rectificación fotográfica: esta metodología permite documentar elementos planos u objetos que puedan descomponerse en diferentes planos. La rectificación sólo se puede emplear en elementos planos que puedan dotarla de información tridimensional, la cual es importantísima en los trabajos de documentación y restauración, dado que facilita el conocimiento del objeto a restaurar, tipos de materiales, deterioros, humedades, pérdidas y el color.
- El escáner láser.

Como técnicas no métricas se emplean:

- Las fotografías.
- Las fotografías 360 °: una de sus aplicaciones más interesante, a parte de la divulgativa, consiste en realizar un montaje que permita contemplar el objeto que se está restaurando durante el periodo de su restauración.
- Los modelos virtuales 3D. Fundamentalmente se emplean en su faceta didáctica y divulgativa; sin embargo, en el IPCE se emplea también para mostrar aspectos relacionados con los casos de estudio sobre los que se estén trabajando. En ocasiones el modelo 3D se ubica en la sala del museo en que se va a exponer como pieza museística.

4. 1. 1. 2 Documentación 3D del patrimonio cultural

Tal y como viene indicándose a lo largo del capítulo, con la documentación se persiguen una serie de estrategias cuyo fin último es recabar la más exhaustiva información posible sobre un bien cultural, empleando diferentes herramientas de captura y representación gráfica.

Aunque las imágenes 2D suelen proporcionar un nivel adecuado de detalle para visualizar bienes culturales, en ausencia de los objetos reales, no siempre muestran a la perfección todas las cualidades físicas de estos objetos, dificultando en ocasiones la comprensión y valoración de determinados elementos cruciales. Por esta razón, el potencial de las técnicas de reproducción 3D para la creación de archivos digitales está convirtiéndose en una premisa tan importante en las tareas de documentación y los académicos en el campo del patrimonio deben concentrar sus esfuerzos en la creación y gestión de archivos digitales en 3D (Galeazzi et al., 2015, p.3).

Para que un modelo virtual sea considerado como documento científico, se deben satisfacer dos características básicas: la representación de un momento temporal concreto, que debe ser siempre bien indicado, y su coherencia dentro del nivel de detalle que describe. La primera de las características viene determinada por la capacidad que estos

modelos tienen para recrear elementos existentes en el presente, hipótesis de situaciones pasadas o proyectos que no llegaron a materializarse (Valle y Rodríguez Miranda, 2011, pp.145 y 147); por su parte la segunda implica la importancia de escoger el nivel de detalle necesario para la representación y la documentación del bien. Sin embargo, una mayor cantidad de detalle conllevará una mayor cantidad de información documentada.

Durante los últimos años han surgido nuevas técnicas de documentación geométrica aplicadas al patrimonio cultural que han supuesto toda una revolución científico-divulgativa dentro de los campos de la arquitectura, el arte y la arqueología (Angás, 2011, p.154).

Actualmente las más empleadas son la fotografía digital, la fotogrametría, el DA, los escáneres 3D, etc... (Pereira, 2012b). La aplicación de estos últimos, especialmente los escáneres terrestres de media distancia, se emplean cada vez más en labores de documentación patrimonial (Lerma, Cabrelles, Navarro y Seguí, 2011, p.113.)

En las últimas décadas, la demanda de nuevos métodos de documentación y estudio ha aumentado notablemente, tratando de buscarse respuestas en los constantes avances que las nuevas tecnologías sufren (García Molina y De Paula, 2012, p.278).

Un ejemplo que ilustra la importancia de llevar a cabo un buen proceso de documentación, constituye uno de los mayores fraudes conocidos en el mundo de la paleontología. Las excavaciones arqueológicas deben ser correctamente documentadas, así como los posibles objetos en ellas encontrados, con el fin de que posteriormente puedan ser estudiados (Seoane y Hernández Ibáñez, 2012, p.58).

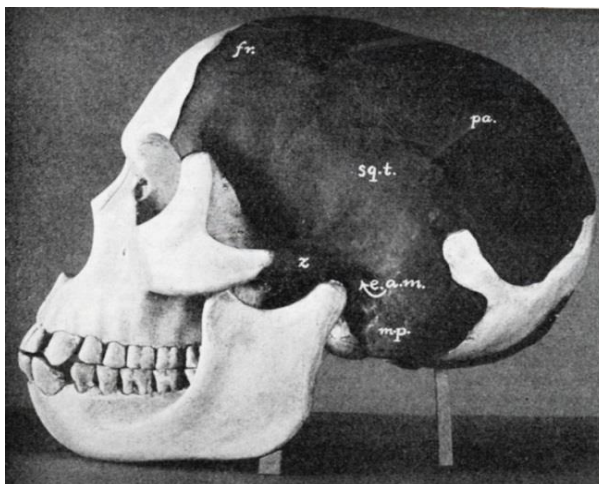


Fig. 120 Cráneo del hombre de Piltdown reconstruido por Smith Woodward. La parte oscura es del fósil original, mientras que la blanca es la parte restaurada. ©National Geographic.

El 18 de diciembre de 1912, se publicaba el hallazgo del eslabón perdido; de este modo, la hipotética especie que relacionaba a los humanos actuales con sus antepasados simios, había sido hallada, corroborando, además, la teoría evolutiva de Darwin. El mismo día, durante una reunión de la Sociedad Geológica en Londres, se revelaron al mundo partes de un cráneo fósil y una mandíbula que supuestamente habían sido descubiertos por un obrero en un lecho de grava en Piltdown, en el sureste de Inglaterra. Los fragmentos pasaron a manos

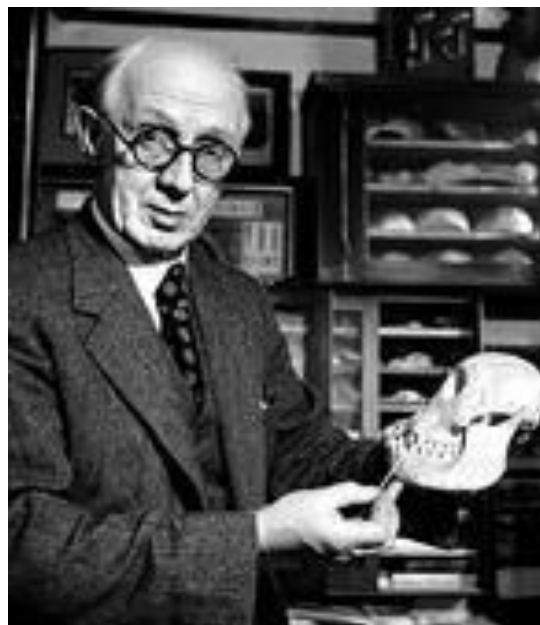


Fig. 121 Dawson, con el famoso cráneo.
©Abc.es.

de Charles Dawson, arqueólogo aficionado que, junto con el eminente paleontólogo Smith Woodward, del Museo Británico, los presentó en Londres. La realidad de la época era que a comienzos del s. XX apenas se habían descubierto fósiles humanos antiguos, y ninguno de ellos en Inglaterra, por lo que el hallazgo resultó realmente apasionante. Woodward denominó oficialmente a la nueva especie *Eoanthropus dawsoni* (el hombre de los albores de Dawson), en alusión a su descubridor, aunque se conoció popularmente como el hombre de *Piltdown*. Los fragmentos óseos guardaban similitudes con los seres humanos y con los simios y fueron aceptados como válidos por la comunidad científica (National Geographic, 2012). Realmente, la teoría cuadraba con las ideas que se tenían por el momento sobre el famoso "eslabón perdido del hombre", puesto que el hallazgo mostraba a un animal con la capacidad cerebral de un humano pero que todavía mantenía rasgos físicos de un simio. De este modo, pasaron las décadas y al fin Inglaterra había obtenido un reconocimiento mundial por este descubrimiento y estaba a la altura de otras potencias europeas como Francia, que tenía al hombre de *Cro-magnon* y Alemania, que tenía al hombre de *Neandertal*. Por supuesto, numerosos científicos dudaron del descubrimiento, sin embargo, a falta de pruebas determinantes y tras los nuevos desenterramientos en 1913 de un canino de simio y en 1915 de otros huesos craneales, las voces críticas se acallaron en gran medida, hasta que los análisis tomados en el año 1935 fueron publicados en 1950 por el geólogo Kenneth Oakley, obteniéndose unos datos desconcertantes, puesto que cada uno de los distintos elementos que componían el hallazgo arqueológico provenían de diferentes

épocas. De nuevo nació la duda y reapareció el duro debate sobre su originalidad. El gobierno inglés, que hasta entonces había negado el acceso a los fósiles por parte de los científicos, se vio obligado a poner en peligro su reputación y concedió un estudio de las pruebas (Cendrero, 2010).

Por tanto, en 1953 el Museo de Historia Natural de Londres anunció que se trataba de un fraude y que todo el conjunto había sido manipulado con el fin de provocar el engaño. Se demostró entonces que el cráneo y la mandíbula procedían de dos especies diferentes, puesto que el cráneo era humano y los fragmentos de mandíbula de un simio, tal vez orangután, tal vez chimpancé, cuyos dientes habían sido limados para parecer humanos. Además, el diente suelto que también fue encontrado pertenecía a un mono, y los animales prehistóricos que aparecieron eran fósiles procedentes de Malta y Túnez, mientras que las herramientas de las que parecían haber hecho uso resultaron ser norteafricanas. El célebre hombre de Piltdown resultó ser uno de los más grandes fraudes de la historia científica. Aunque Charles Dawson es el principal sospechoso, el número de implicados pudo ser mucho mayor, incluyendo a Woodward, Martin Hinton, el conservador del museo, el sacerdote jesuita Teilhard de Chardin e incluso el famoso escritor Arthur Conan Doyle (Cendrero, 2010; National Geographic, 2012).

Realmente el montaje era muy básico. La bóveda craneal humana no tenía más de 50.000 años y la mandíbula de orangután estaba teñida para parecer primitiva con los colores adecuados. Woodward y Dawson desenterraron también herramientas primitivas de piedra y fragmentos de fósiles de mamíferos (manchados para que pareciesen antiguos) entre ellos un hipopótamo y lo que parece un elefante. Los paleontólogos aseguraron que se demostraba con esto que el *Eoanthropus* era tan antiguo como el hombre de *Java*, que actualmente se sabe tiene aproximadamente un millón de años.

Las excavaciones recuperaron durante los dos siguientes años más artefactos y fauna en el yacimiento de Piltdown, incluyendo un diente canino. Pero los trabajos se vieron interrumpidos por el estallido de la Primera Guerra Mundial y el deterioro de la salud de Dawson. Antes de que muriera en 1916, escribió a Woodward diciendo que había encontrado más restos de fauna y del *Eoanthropus* en un segundo yacimiento, a pocos kilómetros del original. Aunque ni siquiera hoy en día se ha esclarecido el origen de todo el montaje, ni quienes fueron los culpables, puede afirmarse que el caso ha marcado la historia de la paleontología puesto que, en otros ejemplos, aceleró la revelación en el año

2000 del fraude del famoso arqueólogo japonés Shinichi Fujimura, que enterraba de madrugada artefactos prehistóricos que sus colaboradores desenterraban durante el día. Pudo también haber retrasado la aceptación generalizada del *Australopithecus africanus* como una reliquia verdaderamente antigua de la evolución humana (De Jorge, 2012).

Con estos casos queda demostrado que es fundamental que se realice una documentación exhaustiva y científica de todos los posibles hallazgos y excavaciones ya sean arqueológicas, paleontológicas, o cualquiera que sea la rama del descubrimiento. Si los datos son accesibles para toda la comunidad científica, la posibilidad de fraude se reduce notablemente, por lo que cuanto mayor sea la documentación obtenida en el proceso de excavación, mayor será el rigor científico del proyecto.

Por tanto, para facilitar los estudios y mejorar notablemente las investigaciones es deseable que toda la información encontrada, a la par que la localización exacta de donde fue hallada, pueda ser visualizada de manera adecuada (Seoane y Hernández Ibáñez, 2012, p.58), por lo que otro logro tecnológico esencial para la arqueología fue la introducción del Sistema de Información Geográfica (Dell Unto, 2014, p.152). Los Sistemas de Información Geográfica (de ahora en adelante SIG) permiten el almacenamiento de información que ha sido georreferenciada y posibilitan la realización de consultas y análisis de datos por medio de diferentes herramientas, como la visualización de la información sobre una representación bidimensional del terreno que puede ser manejada de forma interactiva. El sistema se organiza por medio de capas con una base de datos asociada a cada una de ellas; por ejemplo, las capas pueden mostrar la superficie terrestre, los tipos de suelo, o bien puede tratarse de Bienes de Interés Cultural o de Yacimientos Arqueológicos, etc (Madrigal, 2013, p.132).

Según afirma Barker en 1993, desde principios de la década de los 80, los ordenadores han sido empleados para labores de registro y análisis de datos de excavación. Los SIG se utilizaron para relacionar diferentes tipologías de datos y analizarlos en un modelo predictivo (citado por Van Riel, 2016, p.7). Desde entonces, han revolucionado la forma en que los arqueólogos realizan análisis espaciales. Sin embargo, es necesario destacar que los SIG funcionan como plataforma de gestión de datos y su uso y desarrollo en arqueología depende estrictamente de la posibilidad de tener acceso a nuevas y diferentes tipologías de datos (Van Riel, 2016, p.7).

A finales de los 80, el empleo de modelos de terreno tridimensionales era poco común (Harris, 1987, p.161), mientras que actualmente sus representaciones sobre un modelo tridimensional se están incorporando. Sin embargo, se encuentran aún muy limitadas en el motor de representación y a la hora de mostrar visualizaciones de otros tipos de datos como pueden ser los modelos 3D de objetos hallados o las nubes de puntos obtenidos a partir de escaneos láser (Seoane y Hernández Ibáñez, 2012, p.58).

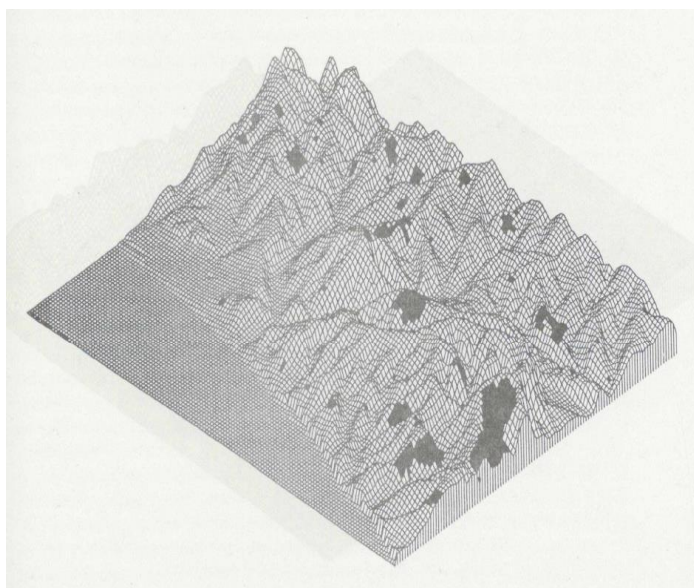


Fig. 122 La imagen muestra uno de los primeros SIG 3D en el que puede verse la selección de sitios visualizados como parches oscuros proyectados en un modelo de terreno digital (MTD). ©Trevor Harris.

En arqueología, la documentación de campo desempeña un papel realmente importante durante el proceso de excavación y la posterior exploración, influyendo significativamente en la planificación exitosa de una investigación en curso. Desde que los ordenadores personales se utilizaron por primera vez en este ámbito, se han empleado instrumentos como el DA, para digitalizar dibujos a mano y registros de campo. Aunque estos instrumentos no son comparables con las herramientas con las que hoy en día se trabaja, su introducción revolucionó la documentación apoyando la creación de mapas que mostraban diferentes niveles de detalle con respecto a un sitio en un solo documento (Dell Unto, 2014, p.152).

Un ejemplo de documentación digital aplicada a objetos de patrimonio arqueológico surge a partir del proyecto iniciado en 2009 *Los Caminos del Neolítico*, con el que se pretendía registrar el proceso de Neolitización hacia el interior peninsular mediante la excavación de distintos yacimientos y ecosistemas varios localizados en el valle medio del Ebro. Fruto de esta investigación se recuperó una gran cantidad de material

arqueológico, mayoritariamente cerámico, cuyo número de piezas varía notablemente en función de cada yacimiento. Así, en *Els Trocs* (Bisaurri, Huesca), se registraron cerca de 40000 fragmentos cerámicos y en *Valmayor XI* (Mequinenza, Zaragoza), la colección documentada fue en torno a 700 restos. Ante tal cantidad de material a estudiar, se hizo necesaria una planificación que se materializó en el diseño del proyecto *Los Caminos del Neolítico II*. Dado que el volumen de la colección de cerámica era muy amplio, se decidió apostar por el empleo de la fotogrametría para su representación a modo de solución que permitiera la elaboración sencilla de dibujos arqueológicos (Arcusa et al., 2016, p.534).

El objetivo principal de la creación de los primeros modelos tridimensionales fue el de obtener la representación gráfica de los materiales arqueológicos. Una vez obtenidos los modelos 3D fue posible aprovechar el trabajo de creación para muchos otros fines, como la elaboración de PDF 3D y distintas posibilidades de divulgación (Arcusa et al., 2016, p.538), que serán revisadas en el capítulo 7.

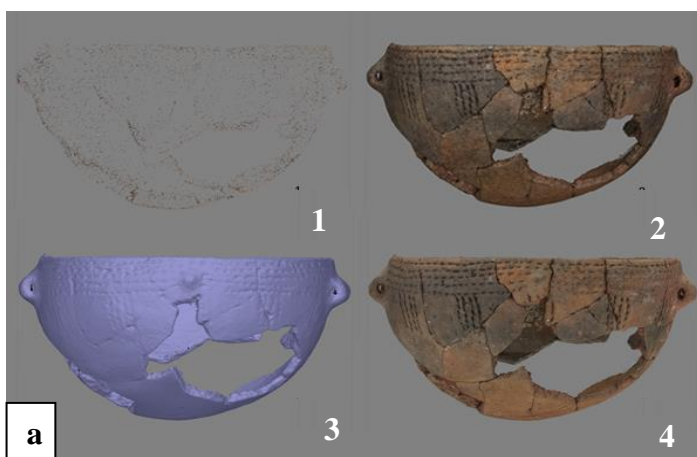
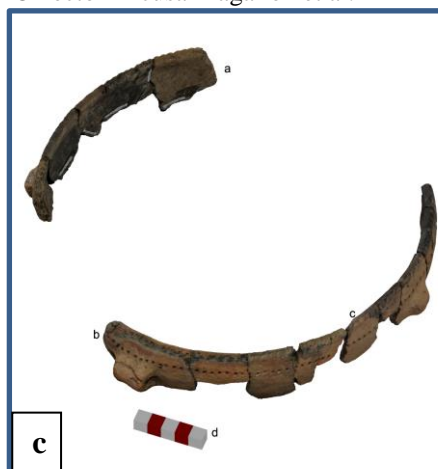


Fig. 123 En la imagen superior (a) pueden verse ejemplos de las diferentes fases del modelado realizado con Photoscan: 1. Nube de puntos dispersa; 2. Nube de puntos densa; 3. Generación de la malla; 4. Texturizado. Abajo a la izquierda (b) puede verse el dibujo arqueológico obtenido a partir del modelo generado de la primera imagen. Por último, abajo a la derecha (c) el recipiente tratado está compuesto por tres partes (a,b,c) que no llegan a pegar pero quedan perfectamente representadas en el modelo virtual. ©Héctor Arcusa Magallón et al.



En el caso de los recipientes arqueológicos, existe la interesante posibilidad de realizar su cálculo volumétrico. Así, por ejemplo, el programa de modelado Blender incluye un script necesario para realizar el cálculo de objetos tridimensionales. A partir del estudio tecno-tipológico y volumétrico de estos recipientes, se pueden obtener una gran cantidad de datos referentes a su funcionalidad, lo que convierte a estas herramientas en imprescindibles complementos si se quiere avanzar más allá de la clasificación tipológica tradicional. Los pasos fundamentales a la hora de acometer un cálculo de volúmenes son, en primer lugar, la selección del recipiente y, en segundo, proceder a la digitalización o bien reconstrucción virtual, tal y como se verá en el siguiente capítulo, de la superficie del mismo, de tal manera que pueda obtener el modelo tridimensional. Por último, debe realizarse el reescalado en formato digital, atendiendo a las medidas de su tamaño real, de

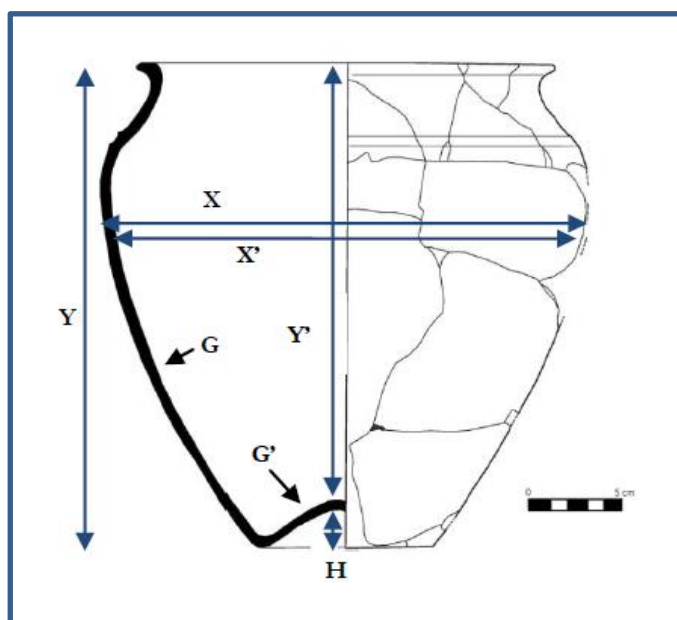


Fig. 124 Variables métricas necesarias para la digitalización y posterior reescalado del modelado tridimensional. Recipiente cerámico procedente del poblado de *Segontia Lanka* en Langa de Duero, Soria. Dibujo del Museo Numantino. ©Álvaro Sánchez Climent y María Luisa Cerdeño Serrano.

modo que pueda obtenerse el volumen correcto y ajustado a la realidad del recipiente. Para realizar el cálculo volumétrico, se ha de atender a la fórmula de cálculo de volúmenes, puesto que un recipiente cerámico, salvo casos excepcionales, tiende a ser un recipiente cilíndrico dónde siempre es aplicada la misma fórmula: $V = \pi r^2 h$, siendo V el volumen resultante, π , la constante 3,1415, r , el radio del cilindro al cuadrado y h , la altura (Sánchez Climent y Cerdeño, 2014).

Cada vez son más numerosos los ejemplos que pueden citarse referentes a patrimonio cultural documentado con técnicas 3D. A continuación, se destacan determinados proyectos de modo que ilustren estas labores.

Para comenzar, como ejemplo de los primeros usos de estas tecnologías con el fin de documentar patrimonio cultural es fundamental citar el proyecto de la Tate *Sculpture*

Replica Project, en el que se digitalizaron obras del artista Naum Gabo. La Tate cuenta con la mayor colección del mundo de esculturas tempranas de Gabo de las cuales una gran mayoría fueron configuradas con materiales de carácter efímero, en plásticos frágiles tales como nitrato y acetato de celulosa. Por ello y a pesar de su almacenamiento en condiciones controladas, acompañado de un programa de monitoreo regular, las obras muestran acusados signos de degradación. El museo estudió el modo de frenar este deterioro, sin embargo, eran conscientes de que este derivaba de la propia naturaleza de las obras, por lo que resultaba muy complicado. Además, hasta el momento no se habían producido casos similares en el campo de la escultura (Heuman & Morgan, 2007). Se plantea entonces la necesidad de realizar réplicas como medida de conservación preventiva por lo que, a principios de 2006, la hija y titular de los derechos de autor de Naum Gabo, Nina, acuerda tras años de negativa, un permiso para realizar réplicas de algunas de sus piezas (Williams, N. & Williams, G., 2007). Por tanto, el museo puso en práctica un proyecto entonces pionero, consistente en realizar reproducciones de algunas esculturas que han de mostrar siempre la palabra “réplica” para no dar lugar a equívocos. Objetivos centrales del proyecto fueron la investigación sobre los métodos más adecuados para documentar las esculturas originales y la clarificación de cómo esta información podría ser utilizada en el futuro (Heuman & Morgan, 2007).

La digitalización de estas obras dentro del proyecto constituye uno de los numerosos ejemplos del empleo de la tecnología 3D en el ámbito de la conservación-restauración. Dadas las circunstancias de degradación de estas obras, determinadas por el carácter autocatalítico de sus materiales constitutivos³⁷, el museo decide realizar una exhaustiva digitalización de las mismas, lo que va a permitir que quede constancia de su existencia y aspecto cuando éstas se encuentren ya muy deterioradas o hayan desaparecido definitivamente.

Tras emplear una documentación tradicional, en la que se incluyeron los datos de las piezas seleccionadas mediante la toma de fotografías mostrando todos sus ángulos y detalles, se buscó un método adecuado para la documentación en tres dimensiones. Este era un problema particularmente difícil, debido a la sensibilidad de los materiales, la complejidad de las formas y la combinación de superficies reflectantes y transparentes. En ese momento, las tecnologías empleadas eran menos eficientes que la actuales, y aunque el

³⁷ Autocatalítico. Se denomina reacción autocatalítica aquella en la que uno de los productos actúa como catalizador.

equipo láser utilizado consiguió registrar la mayor parte de la pieza, existían lagunas (zonas sin registrar), debido al carácter transparente y brillante de la pieza. Esta característica da lugar a que sea atravesada por el rayo láser. Para completar la digitalización se recurre entonces a la fotogrametría como técnica de documentación tridimensional adicional. La combinación de los resultados de la fotogrametría y el escaneo láser aportó mucha más información en tres dimensiones de lo que se había conseguido, pero aún existían limitaciones en ambos métodos que implicaban la imposibilidad de documentar con precisión toda la superficie de la escultura. Por tanto, fue necesaria una tercera técnica para poder obtener los datos que faltaban: el palpador. Cuando se combinaron los datos de las tres técnicas fue finalmente posible construir precisos modelos informáticos tridimensionales de las dos esculturas. Se utilizan, por tanto, los datos derivados del empleo de las tres técnicas, obteniéndose una imagen precisa.

Tras esta experiencia, el proyecto incluyó la digitalización de la obra completa de Gabo, de modo que toda ella estuviera documentada. Los datos registrados sirvieron además para construir modelos o partes de las esculturas si la degradación llegara a hacerse muy evidente. Investigar en los métodos de documentación de esculturas y esclarecer como esa información debería ser usada en el futuro, constituyó el foco principal del proyecto (Heuman & Morgan, 2007).

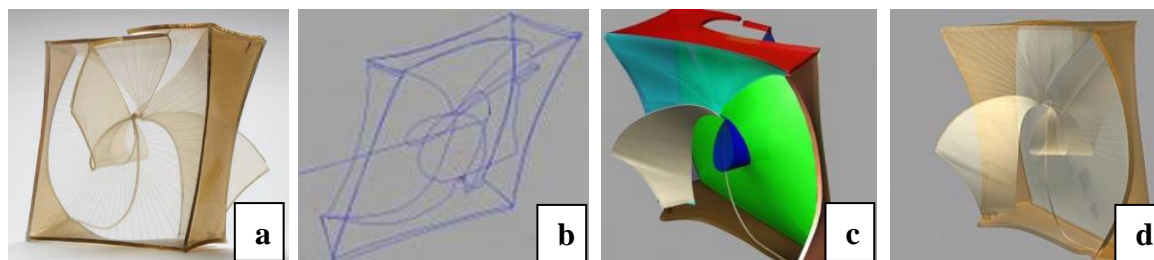


Fig. 125 Proceso de digitalización del proyecto: a) *Construction in Space (Crystal)* de Naum Gabo, 1937-9, Acetato de Celulosa, 220 x 270 x 180 mm. ©Nina & Graham Williams/Tate.; b) Primeras exploraciones de los datos de la escultura. ©Nina Williams; c) Imagen coloreada para mostrar las diferentes secciones con las que la escultura fue construida. ©Nina Williams; d) Resultado final del proceso de digitalización. ©Nina Williams.

Desde 1992, el profesor Marc Levoy y sus estudiantes han estado investigando métodos para digitalizar objetos tridimensionales empleando escáneres láser. En 1996, digitalizaron una pequeña estatuilla de Buda y la enviaron por correo electrónico para que la fabricasen en Los Ángeles, donde se realizó una réplica exacta. Al mismo tiempo, un grupo del Consejo Nacional de Investigación de Canadá examinaba periódicamente objetos

de museos y patrimonio. Por aquel entonces no se había digitalizado ninguna escultura de gran tamaño con suficiente precisión como para servir como recurso principal en un trabajo científico y el objetivo general del proyecto se centró en la obra de Miguel Ángel. Por lo que se denominó *The Digital Michelangelo Project* (Levoy, 1997).

Éste comenzó oficialmente en enero de 1997 con un período de planificación de dos años en el que se diseñó, construyó y probó un mecanismo personalizado para escanear grandes esculturas. Se trataba de documentar las marcas de cincel menores de un milímetro y capturarlas desde una distancia segura, desde arriba hasta debajo de la obra de Miguel Ángel. El sistema final, que denominaron Stanford Large Statue Scanner, fue fabricado para el proyecto por Cyberware de Monterey (California). Emplearon para aquellos lugares difíciles de digitalizar, puesto que la obra no podía ni debía ser manipulada, un segundo escáner, un brazo digitalizador articulado y un pequeño escáner láser de triangulación fabricado por Faro Technologies y 3D Scanners. Por último, para escanear los escenarios arquitectónicos de las estatuas de Miguel Ángel, especialmente la nueva Sacristía de las Capillas Medici que él diseñó, emplearon un prototipo de escáner fabricado por Cyra Technologies. Los tres sistemas también capturaron datos de color de alta resolución. La fase de producción del proyecto, de septiembre de 1998 a junio de 1999, consistió en



Fig. 126 Modelo 3D del *David* de Miguel Ángel producido por el Proyecto dirigido por Marc Levoy. ©2000 Stanford Computer Graphics Laboratory.

escanear las obras de arte y en otoño del 2000, trabajaron en la construcción de modelos 3D. Rápidamente creció la demanda de estos modelos 3D por lo que el catálogo se subió a internet, con libre acceso. Los archivos se encuentran de este modo disponibles para cualquier persona; sin embargo, sólo pueden ser empleados con fines científicos y los usuarios deben primeramente obtener una licencia. Aunque estas licencias prohíben el uso

comercial de los modelos, el permiso para ello se puede obtener contactando con el gobierno italiano. Un uso comercial obvio es la creación de réplicas físicas exactas de las esculturas. En la web puede observarse una réplica física del *David* que fue construida como experimento (Levoy, 1997).

A pesar de los esfuerzos por conseguir escanear cada punto del *David*, determinados recovecos no pudieron ser registrados con el sistema de triangulación láser de la época, por lo que hubo que rellenar agujeros que corresponden a esas zonas sin ser digitalizadas. Por supuesto, para usos científicos han quedado marcadas las partes registradas por el escáner y aquellas que fueron agregadas durante el post-procesado (Levoy, s.f.).



Fig. 127 A la izquierda aparece una fotografía del *David* de Miguel Ángel y a la derecha aparece el modelo 3D conseguido en diciembre de 1999 con una resolución de 1,0 mm. El modelo es estanco y contiene 4 millones de polígonos. El color se calculó a partir de las imágenes en color digitalizadas. ©2000 Stanford Computer Graphics Laboratory.

Además de escanear el rostro del *David*, durante el proceso de registro, se adquirió, junto a fotografías de luz blanca, un amplio conjunto de datos fotográficos bajo iluminación ultravioleta. Gracias a estos datos se obtuvo un mapa de fluorescencia UV que muestra la posición exacta de ceras y otros materiales orgánicos sobre el rostro de *David*. El archivo será empleado en el futuro con el fin de planificar futuros procesos de limpiezas y restauraciones (Levoy, 1999, p.4). Este archivo es fundamental para mejorar el estudio científico de la escultura, puesto que a lo largo de la historia de la restauración, es muy

común que las esculturas se encuentren cubiertas de complejas mezclas de mármol veteado, suciedad, ceras y otros materiales empleados en restauraciones anteriores, a lo que hay que sumar que pueden haber sido expuestas al aire libre durante, en ocasiones, siglos, por lo que pueden haber sufrido diversos tipos de deterioro con el consiguiente cambio de coloración (Levoy et al., 2000, pp.131 y 132).

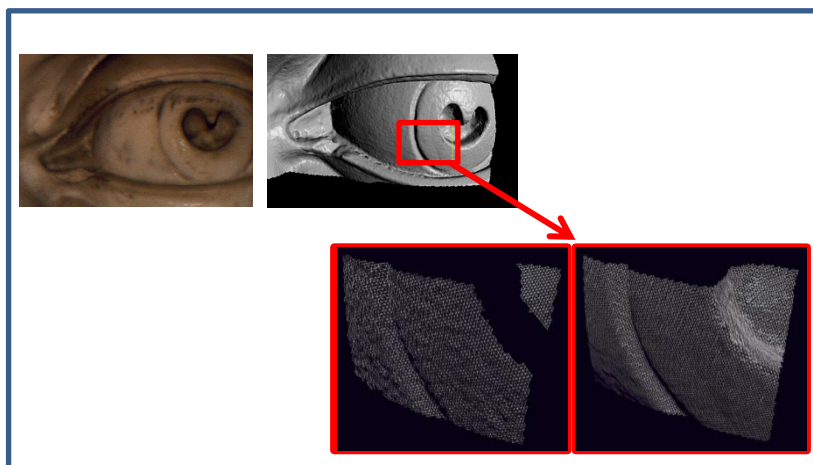


Fig. 128 La imagen de la parte superior, a la izquierda, es una fotografía a color que muestra el ojo izquierdo de *David*. A su derecha puede verse el modelo 3D creado a partir de esa zona, que resultó imposible de escanear por la tecnología del momento. Por ello, tal y como puede verse en la imagen inferior izquierda, que muestra un detalle del ojo ampliado, aparecieron agujeros en el registro. Sin embargo, en la imagen derecha de la parte inferior, puede verse como se cerró la malla para que el modelo fuese estanco en su totalidad. ©2000 Stanford Computer Graphics Laboratory.

Actualmente, si se entra en la página del Archivo Digital del Proyecto (<http://graphics.stanford.edu/dmich-archive/>), las esculturas que fueron documentadas pueden descargarse desde casa, siempre y cuando se haya obtenido la licencia necesaria para ello³⁸.

Otro ejemplo que puede citarse es la intervención en el conjunto de la *Fuente de los Leones* de *La Alhambra*, en la que fue planteada metodológicamente la aplicación de todas aquellas técnicas disponibles para su documentación gráfica que permitieron obtener un

³⁸ Para ello se ha de acceder a la página del Archivo Digital. El contrato con las autoridades italianas, que incluye la declaración de derechos y limitaciones reproducida al final de la página web, permite distribuir los modelos y conjuntos de datos académicos establecidos, solamente para uso no comercial, y prohíbe colocarlos para la descarga automática en la red. Para cumplir con estas restricciones, se pide a aquellas personas que quieran emplear estos datos que envíen un correo electrónico en el que aparezca su nombre, su cargo o posición, y su institución o afiliación, su uso previsto de los modelos y / o los datos y una declaración diciendo que acepta los términos de licencia que a continuación describen.

registro, lo más completo posible, de todas las actuaciones realizadas. La *Fuente*, formada por doce esculturas de mármol blanco de Macael, que representan a leones surtidores, ocupa el eje central de la composición del *Palacio de los Leones* en *La Alhambra* y su construcción se realiza en el segundo periodo del reinado de Muhammad V, entre los años 1362 a 1391. Actuaciones de reformas y conservación en la fuente son desde el s. XVI conocidas puesto que el carácter funcional de la fuente hace que sea necesaria una continua actividad de limpieza, reparación y reposición de los elementos deteriorados.

Las labores de documentación se llevaron a cabo tanto antes de desmontar el conjunto para trasladarlo al taller donde serían intervenidos, como una vez desmontados en el taller. El escaneado del conjunto con el escáner Minolta Vivid 9108 y el registro de las diferentes fisuras, grietas, grapas, costra, etc. que presentaba, permitieron la realización de análisis y mediciones sin la necesidad de manipulación directa de las esculturas. Los modelos creados se podrán usar, además de como referencia del estado original de las esculturas, para documentar el proceso de restauración y como base a la hora de realizar estudios posteriores. Los restauradores podrán también usar los modelos para realizar simulaciones virtuales de reintegración de elementos perdidos mostrando, por ejemplo, la diferencia de volumen eliminado tras una limpieza o para reconstruir las figuras en caso de deterioro o destrucción, siendo posible incluso la construcción de facsímiles si así fuese necesario (Cano, Lamolda, Torres y Villafranca, 2010, pp.89-94).

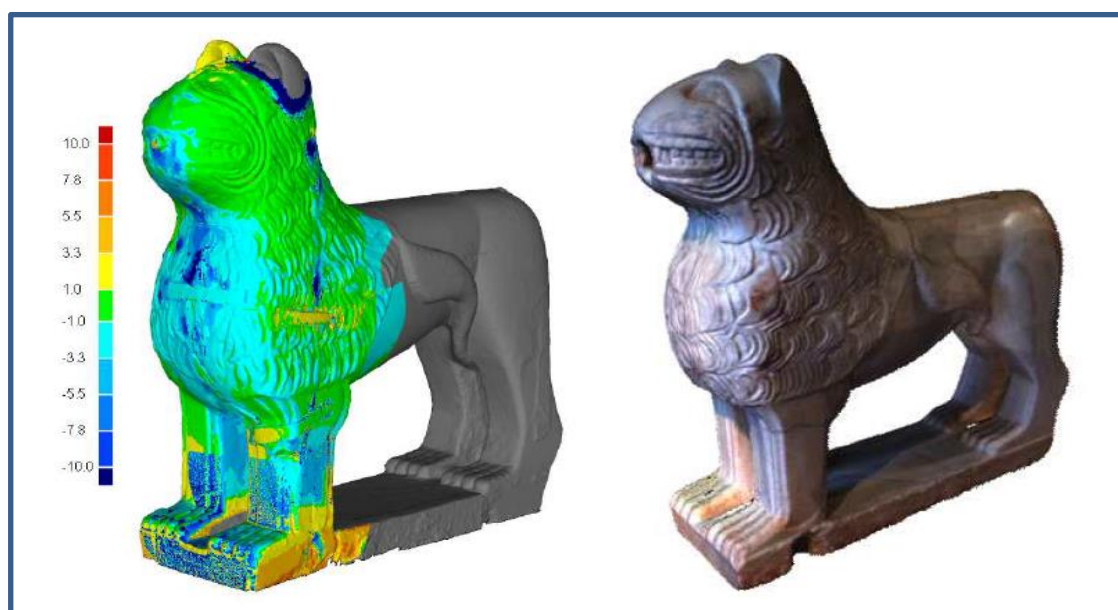


Fig. 129 La imagen de la izquierda muestra el cálculo de diferencias entre volúmenes después de actuaciones de limpieza sobre el modelo del león nº4 y la de la derecha su modelo 3D una vez había sido restaurado. ©Pedro Cano, Francisco Lamolda, Juan Carlos Torres y M^a del Mar Villafranca.

Como puede observarse, garantizar la preservación de los bienes culturales conlleva, actualmente, su digitalización, y por supuesto debe incluirse el patrimonio monumental, por pequeño o insignificante que pueda llegar a parecer. Otro ejemplo de esta premisa fundamental, es el caso correspondiente a uno de los monumentos más conocidos de la localidad palentina de Aguilar de Campoo, la denominada *Puerta del Arco* o *Puerta de Reinosa*, que cuenta con un torreón declarado Monumento Histórico Artístico y alberga una pieza singular: una lápida conmemorativa de piedra caliza datada en 1381, con una inscripción trilingüe en hebreo, castellano antiguo y hebreo aljamiado. La pieza presentaba un importante deterioro que llevó al equipo de la Fundación Santa María la Real del Patrimonio Histórico a plantear la necesidad no sólo de restaurarla, sino también de digitalizarla y documentarla. Así, el trabajo se centró en el escaneado 3D de la lápida y a la toma de más de un centenar de fotografías en alta calidad encaminadas a generar una ortofotografía, que permitió estudiar la lápida en escala 1/1. La actuación en la *Puerta del Arco*, promovida por el Ayuntamiento de la villa y financiada por la Junta de Castilla y León, es el primer paso de un proyecto que pretende extenderse a toda la muralla y a las diferentes puertas de la localidad (Canal Patrimonio, 2015).

Existen instituciones que adoptan un enfoque relativamente abierto en referencia a la tecnología de escaneado de piezas. El Instituto de Arte de Chicago y el Metropolitan de Nueva York invitan a los visitantes a escanear objetos en sus colecciones. El British Museum organizó un "scanathon"³⁹ para el que se solicitó a los visitantes de museos que usaran dispositivos de escaneo y teléfonos inteligentes para crear archivos digitales, y el Museo del Louvre en París organizó una serie similar de talleres digitales. Por su parte, estos museos y el Museo Neues de Berlín han producido sus propios escaneos tridimensionales de alta calidad para fines de conservación interna, reproducción e investigación sin hacer que los datos sean accesibles al público (Wilder, 2016).

³⁹ Según el director de medios digitales y publicación del museo londinense Chris Michaels el objetivo del proyecto era "preservar el conocimiento de un objeto para siempre" (Bryce, 2015).

4. 1. 2 Bases de datos

Actualmente, dado el continuo desarrollo de tecnologías y métodos de extracción de datos que cada vez son más avanzados y se aplican a la investigación sobre el patrimonio cultural, se están produciendo enormes cantidades de datos a un ritmo y con un tamaño cada vez mayores (Sophocleous, Marini, Georgiou, Elfarargy & Mchenry, 2017). Esto es debido a que en las últimas décadas está siendo descubierto el gran potencial que las nuevas tecnologías presentan para el patrimonio cultural, aumentando la creación de bases de datos de acceso a la información y, en consecuencia, su difusión al público (Loscos et al., 2004).

A su vez, la cantidad de objetos que los museos e instituciones albergan aumenta cada año y los fondos comienzan a tener una cantidad de patrimonio que, en ocasiones, si no se lleva un adecuado plan de catalogación y de base de datos, acarrea graves problemas, tales como extravíos de obras, confusiones entre unas y otras, e incluso problemas a la hora de que sean correctamente conservadas.

Sin una información precisa sobre los objetos que se encuentran en un museo, las investigaciones se complican y el tiempo de trabajo aumenta notablemente. El beneficio de la obtención de una réplica digital 3D que ha sido correctamente documentada es que puede almacenarse fácilmente de modo digital y los investigadores pueden manipular la reproducción sin que exista riesgo de causar daño alguno en los originales, que en ocasiones se manipula más de lo debido e innecesariamente. Las copias 3D digitales presentan también la ventaja de ser accesibles de forma remota, facilitando a investigadores de todo el mundo analizar y estudiar la misma colección. Esto supone que pueden compartirse múltiples interpretaciones en tiempo real (Galeazzi et al., 2015, pp.3 y 4).

Además de esto, hay que destacar que las labores de documentación, como bien es sabido en el mundo de la conservación y de la restauración, son fundamentales puesto que ante cualquier intervención se precisa conocer el objeto que va a ser manipulado lo mejor posible (Koroso, 2013, p.200). Por ello, la existencia de datos anteriormente documentados (en otras intervenciones, por motivos de inventariado, de subasta...) son fundamentales para la persona o equipo de trabajo que van a intervenir la obra. Del mismo modo, la

documentación que se lleve a cabo ahora, será en un futuro documentación pasada, que constituirá un valioso documento, siendo igual de relevante entonces que lo es actualmente todos los datos que tomados en el pasado hoy permitan ampliar la información de las obras.

Actualmente los programas de diseño asistido y los sistemas gestores de bases de datos constituyen herramientas fundamentales a la hora de mejorar la visualización de la información espacial e interrelacionar información. Por ello si su utilización es conjunta, se amplía el potencial del proceso de la documentación. Gracias al almacenamiento estructurado de la información digital las tareas de acceso, visualización, gestión, modificación y conservación de los datos se han visto notablemente mejoradas (Koroso, 2013, p.200).

Por ejemplo, para la digitalización de un monumento, siempre según la extensión del mismo, pueden ser necesarios miles de registros diferentes y decenas de miles de imágenes, por lo que esta ingente cantidad de información deberá estar estructurada de forma lógica y relacionada entre sí con el fin de que pueda ser gestionada. Una herramienta adecuada para documentar este tipo de información es la proporcionada por los sistemas gestores de bases de datos relacionales (Koroso, 2013, p.195). Así, una base de datos que sea realmente fiel a la documentación a la cual hace referencias permite conservar en memoria digital el legado del patrimonio cultural (García Molina y De Paula, 2012, p.278).

Un ejemplo que ilustra la creación, el empleo y las utilidades de estas bases de datos aplicadas al patrimonio en España es el Plan Director de Restauración de la Catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz, redactado durante los años 1994-1998, en el que participaron más de 25 equipos de trabajo. El proyecto tenía como objetivo conocer el estado actual del edificio, su evolución histórico-constructiva y plantear un proceso de restauración. Con el fin de divulgar el proyecto e involucrar a la ciudadanía, el programa se desarrolló de manera accesible al público y se realizó un detallado registro de toda la información geométrica y temática que se fue generando por y para la restauración material del edificio. Para la realización del modelo geométrico, que fue levantado con fotogrametría, se dividió la catedral en elementos constructivos basados en los estudios clásicos sobre las técnicas de construcción gótica. La gestión del modelo fue una tarea complicada teniendo en cuenta las características de los ordenadores utilizados a finales de

los 90⁴⁰. Esta base de datos fue articulada siguiendo una estructura relacional que permitía ampliar la información en función del nivel de detalle deseado. En la base de datos creada, el edificio fue descompuesto en elementos constructivos simples (columnas, pilastras, arcos codales, formeros, perpiaños,) y, para la identificación de éstos, se añadieron prefijos que hacen referencia a su posición espacial. En esta base de datos se articularon una decena de tablas que describen diferentes aspectos del estado del monumento como la colonización vegetal, ensayos geotécnicos, estudio litológico, estudio de la composición de morteros, sondeos, termografías, radiografías, estudios de vidrieras, etc. Todas estas tablas se relacionan utilizando campos clave.

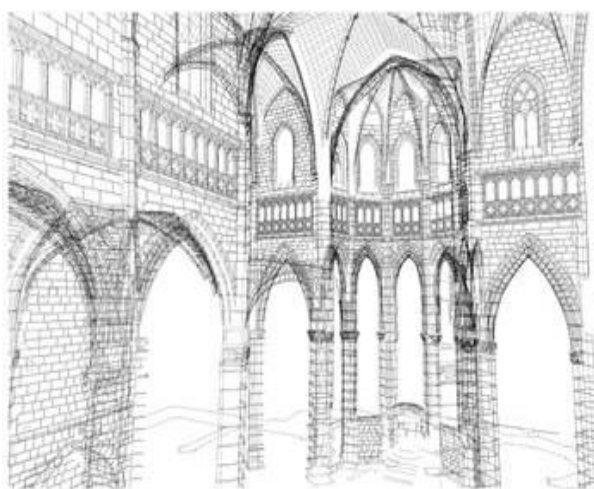


Fig. 130 Detalle del interior de la catedral creado por CAD. ©Iñaki Koroso.

Sin embargo, dado el tema que atañe al presente capítulo, cabe destacar la base de datos utilizada para el registro arqueológico que se denominó *HISTORIA*. Relacionadas con esta tabla existen otras que fueron definiendo los hallazgos encontrados, las relaciones constructivas y de antero-posterioridad con otras unidades, los niveles de agrupación, así como otras características relativas a dichas unidades estratigráficas. Por otro lado, la base de datos *POLICROMÍAS* fue creada para la documentación integral de la restauración artística de la catedral. Se articuló en torno a unidades artísticas definidas por los encargados de la restauración en función de los criterios con los que se acomete la restauración. Estos estudios obtuvieron el premio Europa Nostra 2002, la máxima distinción que la Unión Europea concede a trabajos de conservación y mejora del patrimonio cultural (Koroso, 2013, pp.193-198).

⁴⁰ Se han realizado alrededor de 1600 pares fotogramétricos para crear el modelo 3D de las fábricas de la catedral. Dicho modelo consta de más de 500.000 entidades CAD.

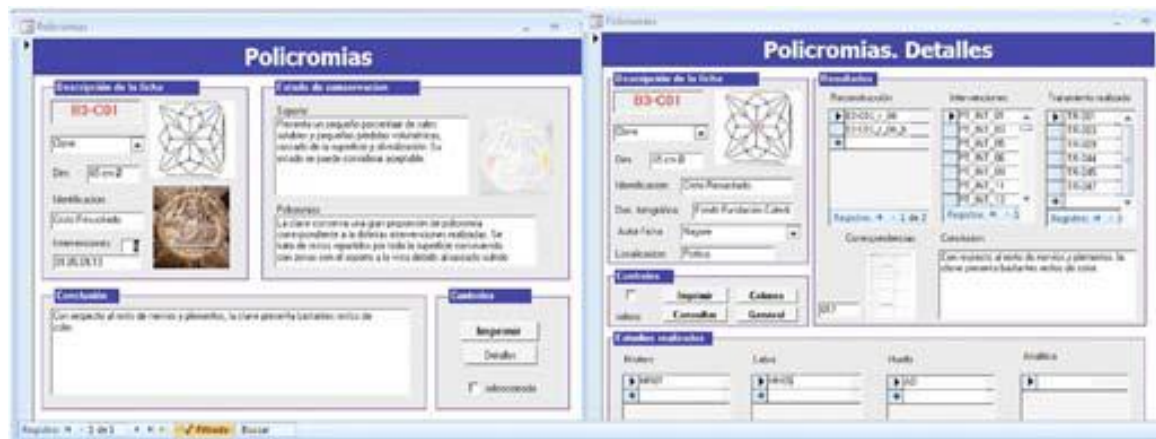


Fig. 131 Formularios de datos con la información relativa a la restauración artística del pórtico. ©Iñaki Koroso.

Cuando se llevó a cabo el proyecto, dadas las características de la tecnología del momento, la tarea de generar el modelo 3D fue muy laboriosa, obligando a asignar un archivo para cada elemento constructivo, de modo que el archivo finalmente se encontraba representado por una línea en un plano guía que representaba el monumento. El modelo contó con 859 archivos para el interior y 357 para el exterior. Años después, en el 2003, el modelo fue reorganizado en función de su ubicación en la catedral, por lo que actualmente el modelo cuenta con 46 archivos de su interior y 21 del exterior (Koroso, 2013, pp.193 y 194).



Fig. 132 Detalle del modelo tridimensional de las excavaciones. El método estratigráfico seguido hizo que la interpretación directa del modelo se complicase con respecto a los alzados del monumento. ©Iñaki Koroso.

La creación de bases de datos es útil para la conservación del patrimonio cultural en general, también dentro del ámbito de la arqueología, en el que son numerosos los proyectos que pueden citarse en los que la digitalización 3D ha sido empleada para tal fin. En muchos casos se ha empleado para ello la fotogrametría a fin de obtener información geométrica de calidad y posibilitar la revisión visual de la excavación (Koroso, 2013 p.194).

En junio de 2010 se celebró en España el Seminario de *Documentación gráfica de Arte Rupestre* celebrado en Murcia, en el que se pretendía tratar el estado actual y las posibilidades de la aplicación de las nuevas tecnologías de la imagen digital.

Los gestores vinculados a los conjuntos de *Côa* y *Siega Verde* presentaron una comunicación conjunta sobre distintas propuestas para documentar este tipo de hallazgos localizados al aire libre. Al respecto, desde ambos conjuntos se indicaba que, finalizada la primera fase de la investigación y difusión, se hacía realmente necesario plantear nuevas acciones encaminadas a la conservación y gestión de los sitios, requiriéndose una documentación de mayor precisión, con el fin de facilitar la revisión y el análisis, así como el diagnóstico y el control, planteándose a su vez las posibilidades que ofrecían las técnicas más modernas asociadas a bases de datos relacionales.

En el caso de *Siega Verde* se disponía de una abundante documentación derivada de anteriores investigaciones puesto que existía dibujo/calco de todos los grabados y croquis de los perfiles de la mayoría de los conjuntos rupestres y paneles, todo en formato .jpg.

Así, la variedad y complejidad que ofrecen las zonas arqueológicas en cuanto a manifestaciones artísticas y a diversidad de la información generada al respecto, ponía de manifiesto la importancia de diseñar una herramienta adecuada de gestión de la información, en la que se encontrasen los datos obtenidos a través de la investigación desarrollada y todos aquellos aspectos relativos a la conservación del mismo.

Como complemento a la información generada, se consideró la necesidad de localizar los distintos paneles en un modelo cartográfico del terreno, por lo que se generó un nuevo modelo cartográfico: una ortofoto de alta resolución y un modelo 3D del terreno, efectuando un vuelo fotogramétrico digital con UAV Microdrones, en distintas pasadas hasta completar la superficie del yacimiento.

Con toda la información (los conjuntos y paneles en los que se localizan los grabados estaban perfectamente identificados) organizada en la base de datos, se planificó una nueva actuación para mejorar la información. Después de distintos intentos y pruebas, siete de los paneles fueron escogidos para desarrollar un proceso de escaneado en alta resolución y precisión de sus grabados, presentando la ventaja de que esta información permanece estable y al estar georreferenciada posibilita la toma de datos reales, facilitando a todo investigador que pueda realizar su propia interpretación y evita la permanente toma de datos de campo con cada nueva investigación. El empleo del escáner supuso la posibilidad de documentar las alteraciones de los grabados (Fernández et al., 2013).

Otro ejemplo de base de datos, esta vez con carácter europeo, es aquella derivada del proyecto *3D-COFORM*, que surgió con el objetivo de abordar los desafíos que las tecnologías 3D presentan para el ámbito patrimonial y se extendió desde diciembre de 2008 hasta noviembre de 2012. Este proyecto, fue financiado por la Comisión Europea y se centró en avanzar en el estado de la técnica de digitalización 3D del patrimonio (Rodríguez Echavarria y Kaminski, 2012, p.116). La conservación del patrimonio cultural europeo es considerada desde hace siglos como una tarea fundamental y necesaria (Cvida, s.f.).

3D-COFORM tiene como objetivo primordial establecer la documentación en 3D como un mecanismo asequible, práctico y eficaz para la documentación del patrimonio cultural tangible a largo plazo (Brighton, s.f.), para lo que propuso ampliar la rentabilidad, eficiencia y utilidad de las labores de digitalización de artefactos históricos en la medida de lo posible con el fin de conservar a largo plazo el patrimonio cultural. La financiación aportada al proyecto en virtud del tema *Tecnologías de la Información y la Comunicación* alcanzó los 8,5 millones de euros. *3D-COFORM* desarrolló un programa variado de investigación técnica dedicado a dar solución a distintos aspectos de la digitalización, tales como el escaneado y el procesamiento tridimensional, las propiedades de los materiales, la semántica de la forma, la integración con fuentes audiovisuales y textuales y la descripción de objetos digitalizados mediante metadatos (Cvida, s.f.).

El equipo considera esencial para la documentación 3D de los bienes culturales el empleo de metadatos⁴¹, que incluyen información sobre la digitalización del bien cultural y de su procesado, así como la información asociada a su historia. Por ejemplo, los

⁴¹ En general, un grupo de metadatos se refiere a un grupo de datos que describen el contenido informativo de un objeto al que se denomina recurso.

metadatos podrían incluir entre otros la fecha de su creación, el autor, información sobre su ubicación, forma y tamaño (Rodríguez Echavarria y Kaminski, 2012, p.116).

Así, generaron representaciones mejoradas y más realistas de distintos artefactos patrimoniales, documentación de mayor calidad y una relación entre coste y eficiencia más adecuada. El consorcio, que fue dirigido por la Universidad de Brighton, en Reino Unido, incorporó aspectos comerciales clave en el proyecto al crear el Centro Virtual de Competencia en 3D *VCC-3D*. Este ofrece servicios de apoyo, recomendación y consultoría a organizaciones dedicadas al patrimonio en vías de iniciar proyectos de digitalización tridimensional. La web de libre acceso de *VCC-3D* proporciona asesoría tecnológica y formativa y ejerce las funciones de biblioteca de recursos digitales. En el 2012 el proyecto *3D-COFORM* creó una exposición estival en Brighton en la que mostró aplicaciones de tecnología 3D a la interpretación, la conservación y la investigación de artefactos y del patrimonio cultural, en la que se brindaba a los asistentes la oportunidad de comprobar los beneficios que genera esta sofisticada innovación científica y tecnológica. Un ejemplo de las digitalizaciones que llevaron a cabo es la figura medieval de un grifo de bronce procedente de Italia o también el templo de *Abu Simbel* del antiguo Egipto (Cvida, s.f.).

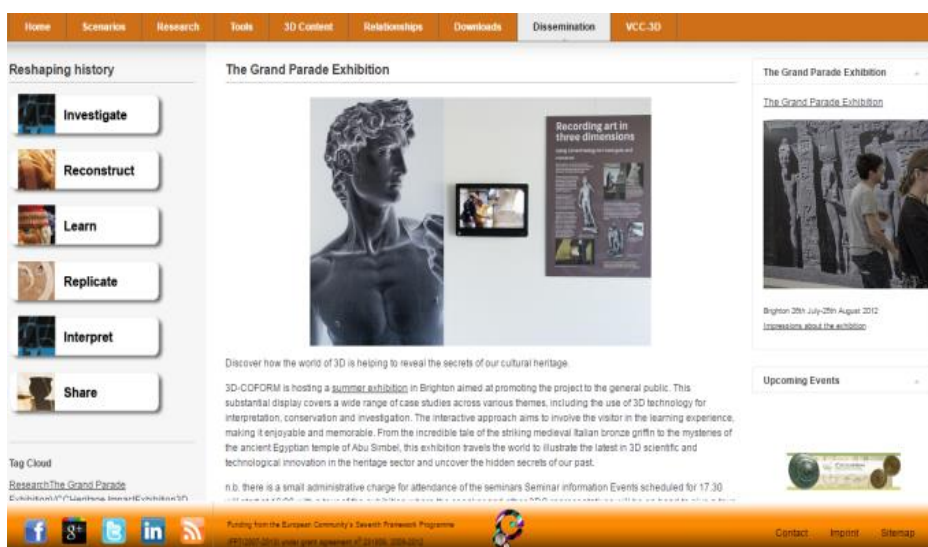


Fig. 133 En la página web del proyecto puede ampliarse la información sobre el mismo. En la pestaña de la exposición, se ven imágenes de la muestra realizada en Brighton. ©3D-COFORM.

El software generado en el proyecto constituye una base de datos realmente sencilla de utilizar ya que la interfaz para la interacción con el contenido digital es muy intuitiva, constituyendo así, un elemento clave para proveer de herramientas la gestión, el análisis y la visualización de las grandes colecciones (Sophocleous, Marini, Georgiou, Elfarargy & Mchenry, 2017).



Fig. 134 Interfaz de 3D-COFORM, en la que aparece una cerámica datada entre 1720 y 1730. A la derecha, puede leerse la información referente al artefacto, mientras que en la parte inferior parecen los objetos que pueden seleccionarse para su visualización. ©3D-COFORM.

El proyecto de *Çatalhöyük* (Catalhoyuk, s.f.), Turquía, constituye un ejemplo fundamental dada la importancia que tiene para la historia del arte y la humanidad.

En 2012, el sitio de *Çatalhöyük* fue declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO como reconocimiento al extenso período de ocupación del sitio, su inusual arquitectura y la organización social igualitaria. *Çatalhöyük* se une así a una larga lista de sitios de importancia mundial, reconocidos por la institución.

Çatalhöyük ha sido objeto de estudio durante más de 50 años. Investigadores de todo el mundo han viajado al sitio durante el último medio siglo con el fin de estudiar sus edificios, sus evidentes formas de vida y las muchas obras de arte y artesanía que en el sitio se han encontrado. Desde 1993, el proyecto ha reclutado a un grupo internacional de especialistas para iniciar nuevos métodos arqueológicos, de conservación y restauración con el fin de mejorar la comprensión de la vida humana en el pasado.

Antes de que las primeras investigaciones a mediados del s. XX fueran realizadas en *Çatalhöyük*, los habitantes de la región eran ya conscientes de la existencia del yacimiento.

En 1958, un equipo de arqueólogos británicos, entre los que se encontraba James Mellaart, tropezó con él. Mellaart y su esposa comenzaron en seguida los planes de excavación en 1961 y, transcurridos 39 días de trabajo, el equipo descubrió 40 casas, así

como estatuillas, cerámica y pinturas murales. Desde entonces hasta 1965, cuando las investigaciones se paralizaron, el equipo regresaba cada verano para continuar con el trabajo (Catalhoyuk, s.f.).

Çatalhöyük consta de yacimientos neolíticos que datan de 7400-6000 a.C., mientras que *Çatalhöyük Oeste* es casi exclusivamente calcolítico (6000-5500 a. C.). El sitio rápidamente se hizo famoso dada la gran cantidad de asentamientos que presenta y por las



Fig. 135 Levantamiento 3D del sitio arqueológico. ©Çatalhöyük.

espectaculares pinturas murales descubiertos en el interior de las casas. Otra característica distintiva es que las casas son unidades complejas que implican actividades rituales y domésticas en el mismo espacio. La evolución del desarrollo arquitectónico del lugar continúa siendo muy polémica y necesita más estudios y análisis en relación con el paisaje y el uso simbólico, ritual y social de los edificios (Forte, 2014, p.124).

En 1993 y hasta la actualidad, las excavaciones e investigaciones han sido reanudadas. A pesar de que los trabajos de campo tradicionales continúan siendo una forma fundamental de investigación en el yacimiento, los métodos de recreaciones digitales, experimentales y visuales se emplean cada vez más mejorando a la investigación y la interpretación.

Además de documentar el patrimonio, están siendo desarrolladas recreaciones virtuales. Un video realizado con los modelos 3D generados por Grant Cox, muestra la recreación del interior de una de las casas, donde puede verse como era la vivienda en el momento (Catalhoyuk, s.f.).

Aunque hayan sido realizados numerosos proyectos de excavación en la zona, solo un pequeño porcentaje del sitio completo ha sido excavado.

Las condiciones críticas específicas de las casas: viviendas de ladrillo de barro, suelos de tierra, sus artefactos, etc., unido las dificultades que se presentan para conservar todas las estructuras *in situ*, requieren la realización de una documentación digital de todas las estructuras, puesto que estas son susceptibles a derrumbarse y desaparecer (Forte, 2014, p.124).

Así, en 2010, gracias a la colaboración del Centro Arqueológico de la Universidad de Stanford y la Universidad de California de Merced, se desarrolla el



Fig. 136 Modelo 3D de la entrada a una casa, que muestra la posición del horno por debajo de la escalera. En *Çatalhöyük* las paredes están construidas con ladrillos de barro y tanto estas como los suelos son de blancos enlucidos. En los muros se elaboran pinturas que representan escenas de caza y patrones geométricos. Los postes de madera gruesos fueron erigidos en el cuarto central y se han utilizado para consolidar la estructura y para crear divisiones internas del espacio. ©Çatalhöyük.



Fig. 137 Visualización de la construcción 89 para el cual se tomaron 130 fotos y se empleó PhotoScan. ©Maurizio Forte.

proyecto *3D Archaeology of Çatalhöyük*. Este proyecto tiene como objetivo reproducir virtualmente el proceso completo de las excavaciones empleando para la digitalización tecnología 3D como escáneres láser y fotogrametría. De este modo, se documenta lo que ocurre durante las tareas de excavaciones, así como todos los posibles hallazgos que puedan aparecer o bien desaparecer, y surge la posibilidad de hacer el proceso de la

excavación virtualmente reversible, puesto que podrán reproducirse todas las fases de la excavación, capa por capa.

De hecho, la documentación 3D de las nuevas excavaciones podría ser vinculada y georreferenciada por capas con los datos registrados en el pasado, reconstruyendo al final un mapa 3D completo del yacimiento unido a todo el contexto estratigráfico. De este modo, se rediseñaría la cronología del yacimiento y las diversas fases de asentamientos. Además, la re-contextualización en 3D de los artefactos en la excavación virtual es fundamental para la interpretación de diferentes áreas de las casas y para estudiar posibles actividades sociales perpetuadas dentro del sitio.

También es fundamental el papel que tiene la documentación obtenida en 3D a la hora de re-componer las pinturas murales y, en general, la decoración de edificios con escenas de la vida social, símbolos o formas geométricas. Por ejemplo, en la construcción 77, fue posible recomponer toda la secuencia de pinturas después de cuatro años de excavación; sin embargo, la secuencia completa no es visible en el sitio, ya que las pinturas son muy frágiles y no pueden ser preservadas in situ, por lo que la única manera de estudiarlas es en el entorno virtual con todos los enlaces a sus metadatos y contextos estratigráficos.

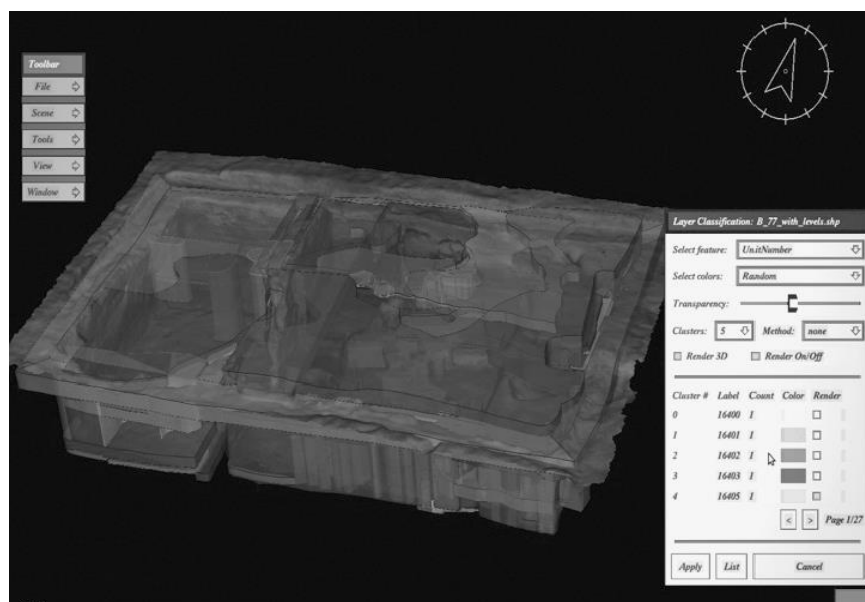


Fig. 138 Construcción 77. La interfaz muestra la integración espacial de las diferentes formas: capas, artefactos y demás elementos en el modelo 3D registrado con un escáner láser. ©Maurizio Forte.

Otro proyecto muy interesante por la gran cantidad de documentación que tiene catalogada en su base de datos es denominado *The Key to Uppåkra: Digitizing a Unique Archaeological Cultural Heritage*, creado en 2015. El proyecto tiene como objetivo crear una base de datos integrada que contenga los datos espaciales y cronológicos de *Uppåkra* que han sido adquiridos a lo largo de los años. Estos datos pueden ser visualizados con fines de investigación o bien por el público en general (ark.lu.se, 2015, citado en Van Riel, 2016, p.32). Para el registro de los datos se están empleando diferentes tecnologías, entre las que cabe destacar escaneado con LIDAR y fotogrametría aérea, además de SIG, GPS y otras (Van Riel, 2016, pp.34-43).

El sitio de *Uppåkra* se encuentra aproximadamente a cinco kilómetros al sur de Lund, en el sur de Suecia y fue descubierto en 1934, cuando las excavaciones revelaron capas culturales (capas con elementos y objetos de patrimonio cultural) que tenían más de dos metros de espesor (Vifot, 1936; Stjernquist, 1996 citados en Van Riel, 2016, p.28), por lo que se realizaron numerosas investigaciones arqueológicas a partir de 1996, cuando se inició el proyecto *Uppåkra Research Project* (Larsson, 2003, citado en Van Riel, 2016, p.28). Entre 1997 y el año 2000, fueron encontrados casi 20.000 objetos durante la fase de detección de metales a gran escala, que sugirieron una secuencia de asentamiento desde la Edad del Hierro pre-romana tardía hasta la última era Vikinga (Hårdh, 2000; 2003, citado en Van Riel, 2016, p.29).

Así, el objetivo principal del proyecto es crear una base de datos integrada que contenga información espacial y cronológica de las diferentes investigaciones arqueológicas realizadas, conectada a una colección visual y en abierto de los artefactos de modo que investigadores y amantes del arte puedan acceder a ella. En primer lugar, se garantiza la calidad y el acceso a la documentación arqueológica del sitio gracias a dieciocho años de

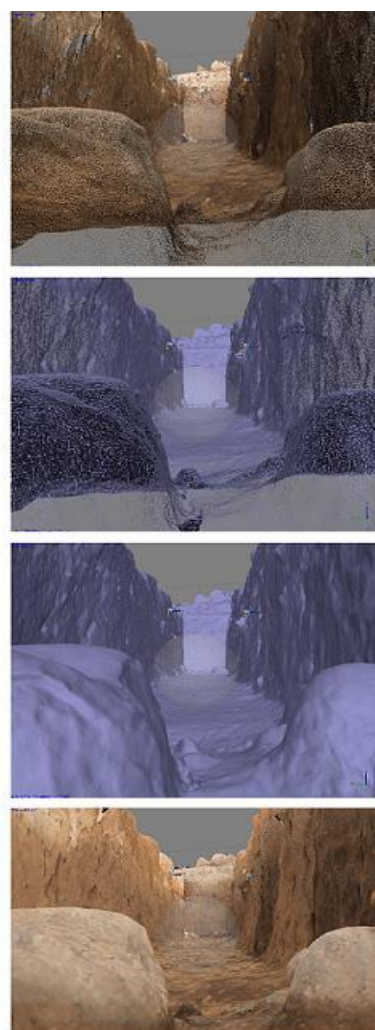


Fig. 139 De arriba a abajo de la imagen puede verse la nube densa, la malla en wireframe, la malla sólida y la malla texturizada de un modelo 3D generado de una de las secciones de *Uppåkra*. ©Sjoerd van Riel.

investigaciones arqueológicas muy diversas que se sincronizan en un marco digital coherente, utilizando Intrasis⁴² y SIG, traduciendo datos digitales en formato visual. En segundo lugar, a la vez que son ordenados temporal y espacialmente, 28.000 objetos serán fotografiados y accesibles en internet, constituyéndose una base de datos que tendrá un alcance global. El proyecto se encuentra actualmente en desarrollo con una fecha fin fijada para el 31 de diciembre de 2018 (Lund University, 2015).

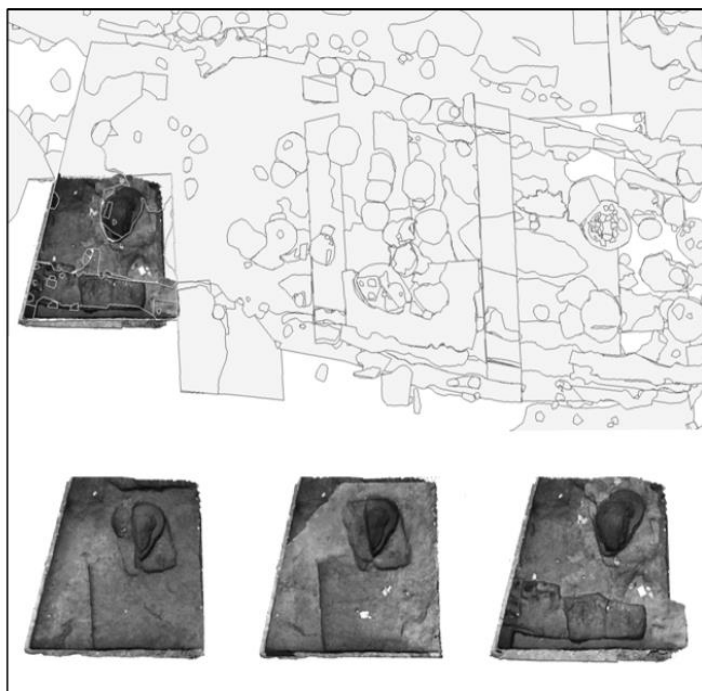


Fig. 140 La imagen muestra un área de investigación de *Uppåkra* seleccionada en 2010 para probar la eficacia de las técnicas de visión por ordenador durante la excavación. La parte superior de la imagen muestra el modelo creado durante la excavación superpuesto a la documentación gráfica creada durante la campaña de investigación. En la parte inferior aparece el modelo de arriba, organizado en secuencia temporal. ©Nicolo Dell Unto.

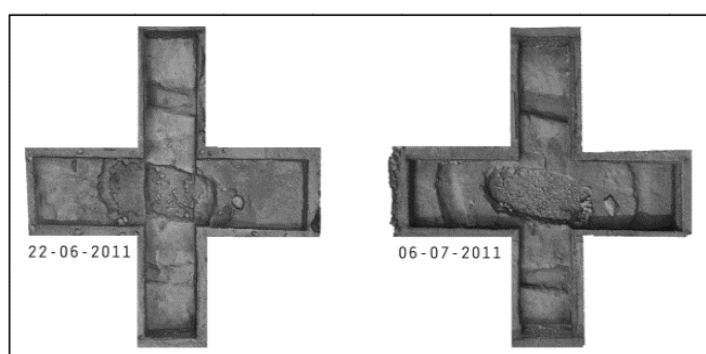


Fig. 141 En la imagen aparecen dos modelos 3D de la excavación que fueron creados en diferentes momentos durante la campaña de investigación. En el modelo de la izquierda, la zanja circular es apenas visible, mientras que, en el otro modelo, el avance de las excavaciones deja ver claramente la zanja. ©Nicolo Dell Unto.

⁴² Intrasis es un software SIG y un sistema para la documentación arqueológica, desarrollado originalmente para arqueólogos y que permite manejar y procesar tanto datos geográficos como otros datos tales como imágenes o documentos de datos no espaciales. El desarrollo ha sido realizado por Patrimonio Nacional de Suecia (Glenler, s.f.).

En España también empiezan a ser numerosas las investigaciones desarrolladas en torno a la documentación de excavaciones arqueológicas. Como ejemplo es fundamental mencionar al grupo *VideaLAB* de la Universidade da Coruña, que trabajó desde 1998 integrando un motor de visualización tridimensional basado en la tecnología SANTI (Sistema Avanzado de Navegación sobre Terrenos Interactivo), con un SIG de software libre dentro de un sistema orientado a arqueología. Se trata de un visualizador 3D interactivo en tiempo real especializado en la representación y gestión de grandes extensiones de terreno que permite al usuario navegar y examinar la geografía contenida en un modelo digital del terreno formado por datos de elevación y por imágenes utilizadas para texturizarlo. El sistema permite dar diferentes órdenes; entre otras muchas, pueden citarse las de añadir, eliminar, cargar, descargar, mostrar, y/u ocultar las capas SIG. Tal y como se aprecia en las fotografías, la combinación de las mejores capacidades de ambas aplicaciones proporciona unas capacidades de visualización tridimensional que mejora la forma de ver y analizar la información de imágenes, modelos 3D, nubes de puntos, etc., generada u obtenida durante la excavación (Seoane y Hernández Ibáñez, 2012, pp.59 -62).



Fig. 142 El sistema fue desarrollado con el objetivo de ser aplicado para la gestión de la excavación *del Castro de la Lanzada* en Galicia. En la imagen puede verse la ventana de gestión de capas y terreno 3D con modelo de nube de puntos e iconos 3D. ©Antonio José Seoane Nolasco y Luis Antonio Hernández Ibáñez.

También merece ser destacada la digitalización del *Castro*⁴³ de San Chuis, Allande, Asturias. Éste surge con el convencimiento por parte del equipo que desarrolló el trabajo, de que la arqueología actual precisa servirse de todas las herramientas que le proporciona la informática, por lo que crearon un proyecto de digitalización y estructuración de todos los datos recogidos en las diferentes campañas de excavación llevadas a cabo en el *Castro*. Para ello, realizaron la Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) del *Castro*, con el fin de conseguir posteriormente la virtualización del mismo, además de la creación de una base de datos general. A partir de esta se construyó una extensa planimetría y una página web con el fin de divulgar la información. En cuanto a la virtualización del *Castro*, realizada con Blender, fueron desarrollados dos modelos congruentes con dos etapas históricas: la Edad del Hierro y la ocupación romana (Molina y Jordá, 2016, p.98).



Fig. 143 Estructura 18 del Castro, la más antigua. Evolucionó de cabaña circular construida en materiales perecederos durante la Fase I de la Edad del Hierro, a cabaña circular y de piedra en la Fase II (a), para terminar rectangularizándose en la época romana (b). ©Juana Molina y Jesús F. Jordá.

Otro ejemplo que puede ser aportado es el proyecto de documentación que desarrollaron las Universidades de Patrimonio Andaluzas denominado *e-Portal*. Este tenía como objetivo principal la divulgación del patrimonio, con el objetivo de llegar al más diverso publico posible, ofreciendo contenido de calidad y facilitando la actualización de contenidos. Además de la creación de una web, se llevó a cabo la digitalización de veinticuatro obras de arte que datan desde el s. XV hasta mediados del s. XX, así como de varias salas históricas que servirían como contenido multimedia y para la creación de escenarios para la realización de exposiciones temporales virtuales, suponiendo una novedad en la difusión del patrimonio cultural en España (Jiménez, García, Revelles y Melero, 2012, p.55).

⁴³ Poblado celta situado en una cima rocosa, amurallado y con diversas viviendas de planta circular o elíptica.



Fig. 144 La imagen de la izquierda muestra el proceso de digitalización de patrimonio mueble, mientras que a la derecha podemos ver patrimonio inmueble. ©Juan Gabriel Jiménez, Manuel García, Jorge Revelles y Fco. Javier Melero.

También pueden citarse ejemplos de bases de datos de otro tipo de patrimonio: el paleontológico, en el que cada vez aparecen digitalizadas un número más amplio de piezas.

Este hecho, además de ser consecuencia del claro avance tecnológico que viene produciéndose en los últimos años y de lo cual ha ido quedando constancia en la presente tesis doctoral, se ve influenciado por el fraude del Hombre de Piltdown. Este caso marcó el modo de documentar en las excavaciones en las que se hallan

restos fósiles de dinosaurios, antiguos animales o primeros humanos, puesto que muchos son los científicos y expertos en excavaciones que quieren evitar al máximo las dudas que puedan surgir en referencia a sus descubrimientos e investigaciones. Por ello, cuando se descubren restos arqueológicos, suben el archivo 3D a una base de datos online, que es

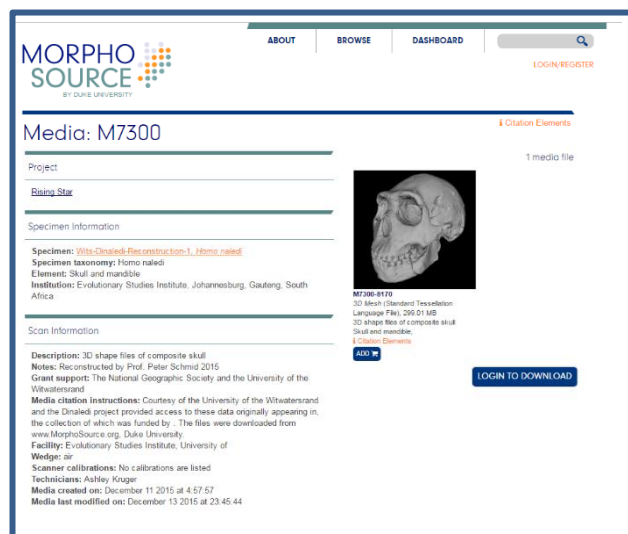


Fig. 145 En la imagen aparece la base de datos de Morpho Source. Se ha escogido el archivo referente al cráneo del espécimen *Homo Naledi*. En la pantalla puede verse toda la información referente al proyecto y numerosa información relevante para los investigadores. ©Morpho Source.

accesible para toda la comunidad científica e investigadores, e incluso, en numerosas ocasiones, para cualquier persona que se registre.

Como ejemplo puede hacerse referencia a la base de datos Morphosource, que permite a los investigadores almacenar y organizar, compartir y distribuir sus propios datos 3D, que pueden ser visualizados y descargados por cualquier persona que se registre. Para ello, los datos se han hecho accesibles a través del consentimiento de los autores. El objetivo de MorphoSource es proporcionar un rápido acceso de los datos raw y las mallas de los modelos hallados al mayor número de investigadores posible. Los formatos de archivo incluyen .tiff, .dicom, .stanford, .ply y .stl. Además de descargar el archivo, se puede navegar por él y visualizar los detalles según convenga (Morphosource.Org, s.f.).

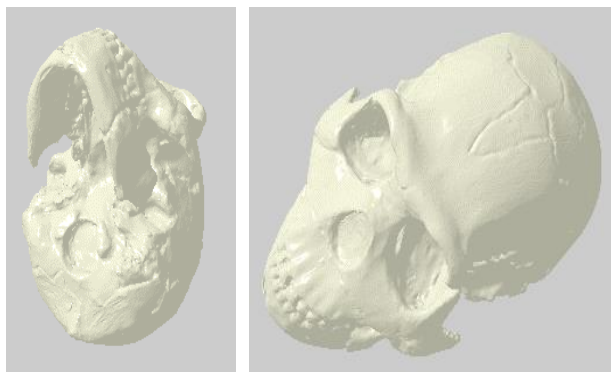


Fig. 146 Exploración del archivo 3D correspondiente al cráneo del *Homo Naledi*. En la imagen de la izquierda puede verse la parte inferior del cráneo, mientras que en la de la derecha, aparece la parte frontal y superior. ©Morpho Source.

Otras bases de datos similares son: NESPOS Pleistocene People and Places, que incluye archivos 3D de alta resolución de fósiles humanos del Pleistoceno (Nespos, s.f.); y ORSA, Open Research Scan Archive, que contiene imágenes de alta resolución (sub-milimétricas) referentes a cráneos humanos mayoritariamente, aunque también cuentan con archivo de cráneos no humanos, todos ellos del Penn University Museum y otras instituciones (Penn MUuseum, s.f.).

4. 2 Sistemas de monitorización del patrimonio

Como ya se ha indicado, la documentación obtenida en datos 3D puede ser muy útil para llevar a cabo la monitorización de los bienes culturales.

Si dicha documentación es realizada en diferentes momentos de la historia de la obra se obtiene un estudio temporal del estado de conservación de la misma, donde es posible medir las variaciones sufridas en dicho periodo, obteniéndose un mapa de los movimientos, deformaciones o el volumen de materia perdida, etc (Lodeiro, 2011, p.10). En ocasiones, los daños que se producen en las obras son descubiertos demasiado tarde, por lo que haciendo uso de monitorización del bien, estos podrían haberse descubierto a tiempo. En el patrimonio arquitectónico, por ejemplo, mediante el empleo regular del escáner láser, las grietas y deformaciones pueden ser reveladas con tiempo suficiente para poder actuar, antes de que el daño sea aún más grave (Hung-ming, Ya-Ning, Min-Bin & Wun-Bin, 2010, p.8).

De este modo, una vez se tiene un registro de los datos obtenidos, realizando la comparación de sucesivos escaneados, se facilita notablemente el estudio de los daños que están produciéndose en una obra, ampliando cuantitativa y cualitativamente la información que habitualmente se obtiene con la fotografía convencional (Ávila, 2017, p.194).

La cantidad y duración de los intervalos existentes entre los registros que han de realizarse son establecidos por los profesionales, variando según el objeto que se monitoriza y los daños que presente. Existen casos de algunos objetos patrimoniales que precisan la realización de un registro mensual, dado el avanzado estado de deterioro que presentan, mientras que otros solo necesitarán un registro semestral, o incluso anual, para casos que presenten buen estado de conservación (Ávila, 2017, p.194).

En el caso del patrimonio arqueológico, los sistemas de monitorización se presentan como una herramienta vital que viene determinada directamente por la fragilidad de dichos bienes, en los cuales el cambio y deterioro de la materia es una constante intrínseca. Generalmente los peligros que afectan a los sitios arqueológicos constituyen las guerras, desastres naturales, contaminación o turismo. Sin embargo, también se ven afectados por las actividades agrícolas, la minería, la extracción de grava, la construcción de infraestructuras y la expansión de áreas industriales. En este contexto, la creación de modelos 3D puede apoyar a las tareas de salvaguarda del patrimonio cultural ofreciendo un “sexto sentido” (Moser, 2005, citado en Stanco & Tanasi, 2011, p.3).

Es fundamental que la tecnología 3D se convierta en herramienta esencial de la documentación de bienes puesto que, como ya ha sido puesto de manifiesto, contribuyen a la preservación y conservación del patrimonio (Hung-ming et al., 2010, p.11).

Tal y como ocurre con las esculturas de Naum Gabo, actualmente existe una gran variedad de objetos patrimoniales extremadamente frágiles y delicados, para el que la implantación de estos sistemas de control resulta especialmente útil. Por ejemplo, otras obras u objetos de diseño concebidos total o parcialmente en distintos tipos de plástico como el acetato de celulosa o el nitrato de celulosa o espumas de poliuretano y obras realizadas con poliestireno. Estos materiales son altamente degradables y muy susceptibles a desaparecer, por lo que solo con una buena monitorización se pueden controlar las alteraciones a la vez que la correcta documentación por medio del registro de la obra deja constancia de su existencia en caso de desaparecer por completo, posibilitando la apreciación y estudio de la obra en su estado virtual o incluso materializándola (Ávila, 2017, p.195)

La empresa Factum Arte, citada anteriormente, realiza tareas de monitorización del patrimonio, entre otras muchas labores. A continuación, se desarrollan algunos ejemplos de sus proyectos que ponen de manifiesto la alta utilidad de la monitorización del patrimonio como medida de conservación preventiva y, con carácter general, como medida de salvaguarda para los bienes culturales.

Así, en 2010 se inicia el proyecto *Felsinae Thesaurus*, como iniciativa para celebrar el 350º Aniversario de la terminación de la Basílica de San Petronio (1663-2013) (Factum Arte, 2013).

Este templo, construido en el s. XIV, constituye una obra maestra de la arquitectura gótica y es el lugar más simbólico de Bolonia.



Fig. 147 Fachada de la Basílica de San Petronio. En rojo aparecen las zonas que fueron digitalizadas. ©Factum Arte.

Anterior a este proyecto, se habían realizado intervenciones previas entre 1972 y 1979, por lo que buena parte de los trabajos de restauración estuvieron enfocados a analizar los resultados que en los anteriores intentos de consolidación se habían obtenido, así como a remover las resinas que estaban causando daños a la piedra. Con el fin de monitorizar estas obras, se contrató a la empresa Factum Arte, recibiendo así el encargo de escanear en 3D en alta resolución todas las esculturas de las tres puertas principales de la fachada inacabada. Los trabajos de digitalización, tanto el escaneado en luz blanca como con fotografía de alta resolución, se llevó a cabo al mismo tiempo que los trabajos de restauración, que fueron asumidos por el Opificio delle Pietre Dure y la Bolognese Restoration Company Leonardo. Las tareas de documentación comenzaron en abril de 2013, buscando desde el principio llevar hasta el límite el potencial que ofrecen los escáneres de alta resolución y establecer un protocolo que proporcionara registros para la producción de facsímiles exactos de las piezas en caso de que en un futuro sea necesario, por lo que se llevaron a cabo pruebas con diferentes resoluciones.

Finalmente, cuatro sistemas de escaneado 3D (tres escáneres de luz blanca y un escáner láser de gama media) sirvieron para digitalizar la forma y el volumen de las obras de la fachada mientras que la información referente al color fue obtenida mediante una rigurosa documentación fotográfica. Estas esculturas fueron realizadas por más de 20 escultores diferentes entre 1430 y 1435 siendo la mayoría de las obras, por tanto, del Quattrocento. Como técnica complementaria se colaboró con la empresa Scan Labs y su sistema Faro focus X330, digitalizando así a media distancia el conjunto de la fachada, con el fin de posicionar las diferentes secciones en alta resolución digitalizadas con los otros sistemas.

Como parte final del proyecto, Factum Arte prototipó a escala 1:5 las figuras centrales de la puerta principal a partir de la información 3D recogida. Para ello, se empleó una impresora de sinterizado láser que construyó los modelos en poliamida blanca y con una resolución entre capa de menos de 100 micras (Factum Arte, s.f. e).



Fig. 148 A la izquierda aparecen las impresiones 3D de tres estatuas de la puerta central: *San Ambrosio*, *Madonna*, *San Petronio*; a la derecha la recreación de la puerta central a partir de impresiones en 3D. ©Factum Arte.

La *Deposición de Cristo* de Amico Aspertini, es una de las obras que se digitalizó y fue restaurada. El brazo izquierdo de Cristo fue retirado durante las intervenciones por razones de seguridad, puesto que su estado de conservación le hacía susceptible a desprenderse del cuerpo mientras se realizasen los tratamientos sobre la obra por lo que se digitalizaron la escultura, por un lado, y el brazo por otro, obteniéndose dos modelos 3D.

El trabajo realizado en estrecha colaboración con los restauradores permitió que se documentaran momentos cruciales de la restauración, como antes, durante y después de la limpieza. La Opificio delle Pietre Dure encargó a Factum Arte reproducir el brazo izquierdo de Cristo como una impresión estereolitográfica por lo que el antebrazo de Cristo fue escaneado y la junta se trabajó con el programa Zbrush, para permitir la unión perfecta y facilitar la tarea de adherir



Fig. 149 La imagen de la izquierda muestra la escultura antes de que los procesos de restauración finalizasen, con el brazo aún en su sitio. Por su parte, la imagen de la derecha muestra la escultura durante el proceso de restauración, cuando el brazo ya había sido retirado. ©Factum Arte.

el nuevo brazo al muñón original. Antes de crear la reproducción definitiva la precisión del modelo 3D se examinó virtualmente para asegurar una alineación perfecta entre las dos partes.

El escaneado también permitió determinar la orientación de la espiga de latón que une el brazo original con el antebrazo. Durante el proceso de modelado se introdujo un canal en el que se inyecta el pegamento para dar un enlace perfecto y una inclinación exacta. Se utilizó un pivote de acero para unir las dos partes sin poner en peligro la frágil estatua.



Fig. 150 En la superficie del brazo fue posible identificar los diferentes tratamientos realizados durante restauraciones anteriores, en las que diferentes materiales, como resina y mortero, habían sido empleados con el fin de estabilizar el miembro. ©Factum Arte.



Fig. 151 Modelo de la escultura digitalizado. ©Factum Arte.



Fig. 152 Diferentes vistas del brazo digitalizado. ©Factum Arte.

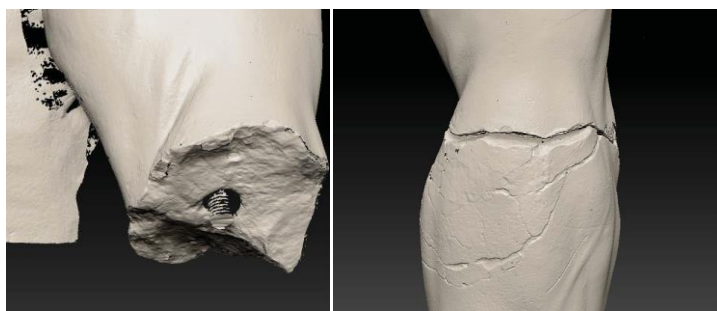


Fig. 153 A la izquierda el escaneado del antebrazo y a la derecha su reintegración virtual. ©Factum Arte.

De la impresión realizada, se fabricó un molde de silicona que fue utilizado para hacer el positivo en una resina, más ligero que el original y con una mayor resistencia a los agentes atmosféricos que causan daños en la piedra. A pesar de que el facsímil del brazo y la prueba de encaje fueron muy correctos, los encargados restauradores decidieron tratar el brazo original y volver a colocarlo. Sin embargo, el archivo 3D, el molde del brazo y el propio positivado favorecen la conservación del original⁴⁴. (Bayod, C., comunicación personal vía e-mail, 2 de noviembre de 2017; Marchiorio, B., comunicación personal vía e-mail, 21 de marzo de 2014). Los investigadores que precisen estudiar el brazo pueden analizar estas alternativas por lo que se evitan así numerosas manipulaciones del original. Además, en el mal caso de que el original sufriese daños mayores, podría ser reintegrado.



Fig. 154 Prueba de unión en la que el brazo impreso es encajado en la posición exacta en la cual deberá adherirse una vez se realice el molde y positivado. Con esta prueba queda asegurado que las uniones se realizarán óptimamente. ©Factum Arte.

Otro importante proyecto llevado a cabo por la empresa, apoyado por Factum Foundation, fue desarrollado en Tudela, Navarra. En enero 2012, un equipo de Factum viajó al Claustro de la Catedral de Tudela para corroborar el deteriorado estado de los cincuenta capiteles, uno de los conjuntos escultóricos románicos más importantes de Europa. Debido a las características de la piedra en la que está construido y a la mala

⁴⁴ El equipo de Factum Arte ha colaborado en la revisión de toda la documentación escrita con el fin de aumentar la información que aparece en su página web: Biancamaria Marchioro aportó numerosa información y las fotografías utilizadas sobre el caso, por medio de un correo electrónico enviado a la autora de la presente tesis el 21 de marzo de 2014, cuando esta se encontraba realizando las prácticas de empresa con ellos. El correo incluía un pdf que facilitó los datos y fotografías actualmente referidos. Por otro lado, Carlos Bayod Lucini facilitó información (corroborada por Voula Paraskevi Natsi y Pedro Miró Infante, responsables del proyecto) a través de otro email recibido el 2 de noviembre de 2017.

praxis de restauraciones llevadas a cabo en el s. XX, los capiteles se están deteriorando a gran velocidad. Por ello, en junio de ese año, se escanearon con luz blanca dos de los capiteles y desde entonces se procesa y analiza la información. Los resultados revelan la velocidad alarmante con la que estos capiteles románicos pierden su trabajo de talla. Un estudio comparativo realizado con fotografías históricas y documentación reciente revela la gravedad del deterioro.



Fig. 155 Mapa de daños realizado sobre una imagen del *Capitel de la Virgen*. Los colores muestran los diferentes tipos de deterioro que se están produciendo en la actualidad: en rojo las grietas; en amarillo el material desaparecido que se ha desprendido; en morado las picaduras (deterioro consistente en agujeros ciegos, muchos y juntos. Estos agujeros tienen una forma cilíndrica de un diámetro de pocos milímetros); en turquesa claro la erosión (material que se ha desprendido debido a la contracción/expansión de agua a lo largo de las diferentes estaciones del año); en gris los parches de gasa colocados para evitar que más material se siga cayendo; en azul la pulverización (material desprendido en forma de polvo) y en turquesa oscuro la pátina (cambio del color de la piedra debido a sedimentos superficiales). ©Factum Arte.

Además de realizar el proceso de monitorización a través de la digitalización de los capiteles, se ha impreso el *Capitel de la Virgen*, con el fin de tener un testimonio físico del estado en el que este se encontraba en el 2012 (Factum Arte, s.f. a).



Fig. 156 *Capitel de la Virgen* en diferentes épocas: en blanco puede verse las zonas que se han desprendido y en rojo las grietas. ©Factum Arte.



Fig. 157 Impresión de los datos 3D del *Capitel de la Virgen*. ©Factum Arte.

Otros proyectos de monitorización realizados por la empresa Factum Arte son la digitalización de *El asesinato de San Pedro Mártir* de 1507, obra de Giovanni Bellini que se encuentra en la National Gallery. El cuadro constituye la primera obra escaneada en 3D antes, durante y después del proceso de restauración. La primera sesión en la que se escaneó la parte frontal y trasera del cuadro antes de la restauración fue llevada a cabo por el equipo de Factum Arte formado por Carlos Bayod y Arthur Prior en septiembre del 2014 con el escáner Lucida 3D, diseñado especialmente para el registro en alta resolución de cuadros y bajorrelieves. Esta cualidad hace que el sistema sea especialmente útil para monitorizar cambios en el material de soporte de un cuadro debido a los tratamientos de consolidación (Factum Arte, s.f. c). Por su parte, también puede recordarse la digitalización y monitorización del *Gough Map*, en la Bodleian Library en Oxford. El mapa está reconocido internacionalmente como uno de los más antiguos que muestran Bretaña de una forma reconocible (Factum Arte, s.f. b). Otra monitorización de gran relevancia es la realizada en la *Tumba de Tutankamón*. Este proyecto será desarrollado en el capítulo 6, pero puede anticiparse que los datos obtenidos están siendo actualmente empleados para monitorizar la evolución del deterioro que está teniendo lugar en la tumba (Factum Arte, s.f. d).

Por último, de los proyectos desarrollados por la empresa, no puede dejar de mencionarse el importante plan de monitorización de las tumbas del *Valle de los Reyes*. La primera prueba de escaneado, como proyecto piloto, se realizó en 2001 en la *Tumba de Seti I* y entre los años 2009 y 2012 se completó el facsímil de la *Tumba de Tutankamón* (ver capítulo 6). Los datos empleados para su realización se emplean actualmente para monitorizar la evolución del deterioro que está teniendo lugar en la misma. Los datos fueron publicados en 2011 por la empresa y fueron guardados en un núcleo de

almacenamiento para, posteriormente, llevar a cabo la laboriosa tarea de procesar toda la información de una manera planificada y sistemática. A pesar de que la Factum Foundation promueve que el acceso a los archivos sea libre, es el Ministerio de Antigüedades de Egipto la entidad que tiene la última palabra, puesto que es el beneficiario de todos los derechos comerciales, presentes y futuros. Finalmente, se ha conseguido liberalizar el acceso para cuestiones de conservación, control, monitorización y estudios académicos (Factum Arte, s.f. d).

Sin embargo, durante el año 2016 el equipo ha vuelto a trabajar en la *Tumba de Seti I*. Factum Foundation establecerá un centro de digitalización y formación en la conocida como Casa Stopplaere, del arquitecto Hassan Fathy. Esta se encuentra en el mismo recinto donde se alberga la *Tumba de Tutankamón* y que hospedará la réplica del *Mausoleo de Seti*. Esta casa, una vez sea restaurada, abrirá sus puertas a aquellos que deseen aprender el empleo de las nuevas tecnologías en la preservación del patrimonio histórico y cultural (Canal Patrimonio, 2016).

No puede dejar de mencionarse, recordando el capítulo 1, que el estado de conservación de una obra también puede analizarse con el perfilómetro lo que puede ser muy útil a la hora de estudiar y crear registros del estado de conservación del patrimonio. Por ejemplo, determinadas obras de artes realizadas o compuestas de algún tipo de plástico, lo que como ya ha sido mencionado con anterioridad, conlleva una complejidad química que dificulta las tareas de su conservación y restauración. De este modo el estudio de limpieza llevado a cabo en la cabeza de una muñeca danesa de los años 70, fabricada de forma hueca en plástico semirrígido, tuvo que recurrir al perfilómetro para establecer su estado de conservación de forma científica. Es cierto que empleando micrografías comprobaron que la suciedad era evidente en la superficie de la muñeca, pero al emplear el perfilómetro observaron que, además, la superficie no era ya lisa y homogénea si no que presentaba cierto relieve. El perfilómetro, por tanto, junto con otras pruebas como espectroscopia ATR-FTIR y cromatografía de gases, sirvieron para realizar la propuesta de limpieza de la muñeca. El caso ha planteado una metodología de limpieza destinada a objetos de arte realizados en plástico PVC (Morales y Egsgaard, 2010, pp.83-86).

4. 3 Importancia de la documentación para el patrimonio perdido

Toda documentación se presenta fundamental para la conservación de los bienes culturales; sin embargo, adquiere un valor añadido en aquellos casos extremos en los que frenar el deterioro de la obra resulta muy complicado o incluso imposible (Ávila, 2017, p.195). De este modo, la importancia de una buena documentación viene así dada por el hecho de que un bien cultural que sufre un daño o pérdida irreparable y no está apropiadamente documentado, desaparece para siempre (García Molina y De Paula, 2012, p.278).

Por ello, es innegable que todos aquellos dibujos conservados que realizaron viajeros a finales del s. XVIII han contribuido, si bien en muchos casos idealizados, a documentar un sinfín de escenas y monumentos de un patrimonio cultural que en numerosos casos hoy ya han desaparecido (Angás, 2011, p.155).

En esta línea, debe estudiarse el caso del Fragmento perdido del Muro Sur de la *Tumba de Tutankamón*, que será descrito en el capítulo 6, como se ha indicado. Gracias a una fotografía tomada por el propio descubridor y actualmente conservada por el Griffith Institute en la que aparecía el muro al completo, se pudo realizar la reconstrucción de la sección faltante. De este modo, los datos fotográficos han sido materializados, constituyendo el único documento físico existente, puesto que la sección original continúa en paradero desconocido (Factum Arte, s.f. d).

Es evidente que Harry Burton no imaginó que su trabajo fotografiando la excavación de Howard Carter de la *Tumba de Tutankamón* en 1922 permitiría un día semejante proyecto (University of Oxford, 2014). Es un claro ejemplo en el que se constata la importancia de documentar todo lo referente a excavaciones y patrimonio cultural. Si estas fotografías no hubiesen sido conservadas y, por supuesto, si no hubiesen sido tomadas, la documentación e información referentes a este muro, jamás se hubiesen conseguido.

La información obtenida en bases de datos y mediante los sistemas de monitorización, permite, de este modo, que quede constancia de la existencia o apariencia que tuvo la obra en algún momento de su discurso histórico.

Whalen, del Getty, resalta la importancia que estas labores tienen dado que el mundo está perdiendo su patrimonio cultural arquitectónico y arqueológico antes y más rápido de que este se haya podido documentar. Los desastres originados por la mano del hombre son las mayores causas de estas destrucciones, aunque los desastres naturales son también razones que provocan la desaparición acelerada del patrimonio. Es lógico que, aunque se deba preservar tanto como sea posible, no todo puede ser salvado, por ello documentar todo ese patrimonio antes de que desaparezca es una de las opciones disponibles para los profesionales del patrimonio que más fuerza cobra (Whalen, 2007, p.7).

La arqueología es un proceso destructivo, puesto que las excavaciones requieren el desmantelamiento de estructuras, así como el desplazamiento y eliminación de hallazgos como pueden ser herramientas, cerámica y huesos, por lo que el registro detallado del proceso es imprescindible para una correcta documentación. Registrar digitalmente el progreso de una excavación arqueológica empleando técnicas como el escaneado láser, el video digital, la fotografía panorámica o el SIG, puede ser realmente útil (Allen et al., 2004). En el caso del escáner láser, ha sido amplia y satisfactoriamente empleado para documentar el proceso de las excavaciones; sin embargo, a pesar de la capacidad de estas herramientas para capturar una gran cantidad de datos 3D en un tiempo relativamente corto, muchos modelos no pueden emplearse como una herramienta única para documentar la estratigrafía arqueológica en 3D, puesto que la información referente a la colorimetría no puede ser captada (Van Riel, 2016, pp.13 y 14). Esta limitación, como pudo verse en el capítulo 1, tiende a desaparecer dada la integración de registro de color en los escáneres, sin necesidad de combinar los datos 3D con fotografías.

De este modo, la arqueología preventiva surge como conjunto de actividades destinadas a evitar o a minimizar el daño de la obra pública o privada en el patrimonio arqueológico. Puesto que los restos arqueológicos no son infinitos ni renovables y que la excavación de un yacimiento supone su destrucción total o parcial, es necesario excavar menos y documentar más, tal y como se ha recogido ya en las legislaciones de algunas comunidades autónomas, que plantean la necesidad de crear “zonas de reserva”, como la Comunidad Valenciana y Castilla y León, en las que se dejan partes de yacimientos no excavadas (Dietz, Catanzariti, De la Presa y Jimeno, 2011, p.119).

Otro ejemplo de patrimonio cultural especialmente delicado es aquel conservado al aire libre, que experimenta una aceleración de los procesos de degradación frente a obras conservadas en interiores. Los daños vienen determinados porque las obras sufren de manera constante las agresiones climatológicas de la lluvia, el hielo, el sol, el viento y las agresiones antrópicas como actos de vandalismo, expolio y visita de miles de turistas. Como consecuencia, estas obras suelen ser objeto de numerosas intervenciones que con el paso del tiempo terminan alterando la imagen que los bienes tuvieron en su origen (Grande, 2013, p.16).

El Grand Palais y el Museo del Louvre de Francia trabajan en conjunto bajo patronazgo de la UNESCO, en colaboración con Iconem con el fin de presentar una exposición gratuita que permitirá explorar y redescubrir importantes sitios arqueológicos que ahora son inaccesibles. Todos han sido reconocidos como Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO y actualmente se encuentran amenazados por los conflictos en Afganistán y Oriente Medio. En marzo de 2001, el mundo observó con consternación como las estatuas gigantes de Buda en Bayiman en Afganistán fueron deliberadamente destruidas. En 2015, Palmyra, en Siria sufrió una extensa destrucción y son numerosos los yacimientos arqueológicos de Oriente Medio que han sido amenazados por el conflicto, el saqueo y la demolición, siendo hoy por hoy, inaccesibles. Sin embargo, gracias al empleo de las nuevas tecnologías, los restos documentados pueden ser recreados digitalmente usando mapas 3D y surge la posibilidad de transmitir estas joyas culturales a las generaciones futuras.

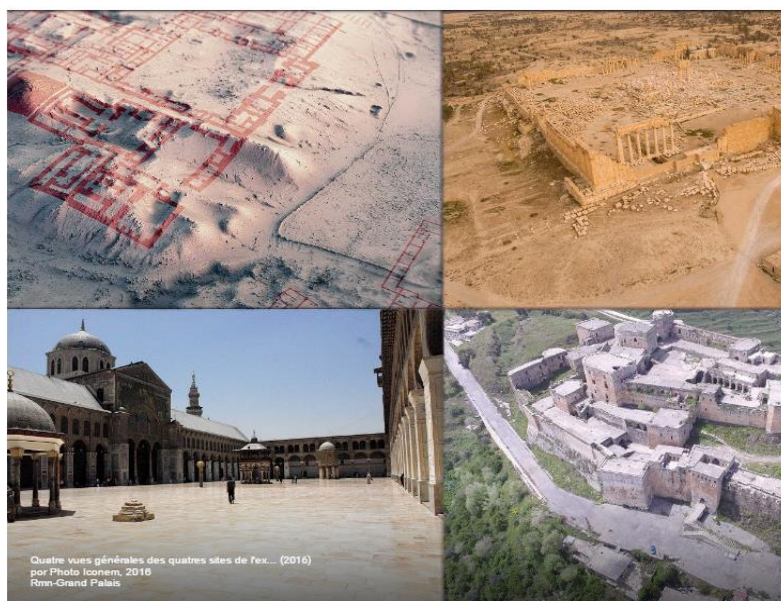


Fig. 158 En la imagen aparecen los 4 sitios de la exposición *Eternal Sites*. ©Photo Iconem.

La exposición, que lleva por nombre *The Eternal Sites*, permite sumergirse en cuatro de estos sitios arqueológicos. Para ello, entrando en la web de Google Arts & Culture, actualmente puede leerse una breve introducción de la exposición, seguida de videos que explican la historia y detalles de cada uno de los lugares documentados. Mientras ve el video, el usuario es partícipe del escenario puesto que puede navegar a través de él. A continuación, se incluyen las capturas de pantalla que han sido realizadas mientras el video estaba en marcha, en referencia a los 4 lugares citados (Google Arts & Culture, 2016).

La ciudad de Palmyra es hogar de las monumentales ruinas de una gran ciudad que fue uno de los centros culturales y comerciales más importantes del mundo antiguo al ser punto medio entre el Eufrates y el Mediterráneo, donde se cruzaba la ruta que une el Este y el Oeste. La diversidad de las diferentes civilizaciones que la habitaron dio lugar a que su arquitectura combinase las técnicas greco-romanas con las tradiciones locales. En octubre de 2015, fue bombardeada con dinamita por el estado islámico.

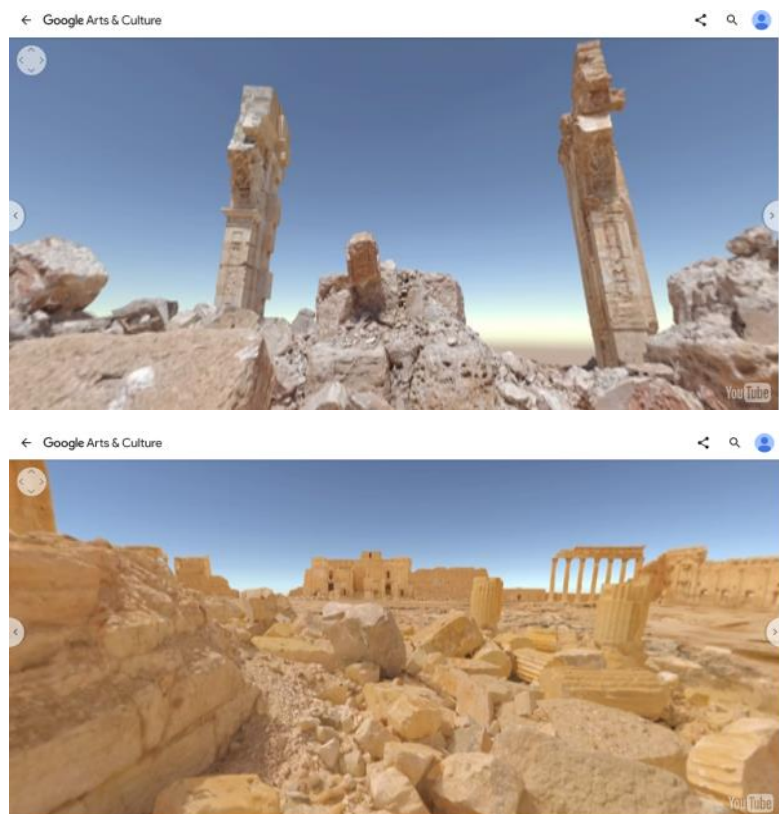


Fig. 159 Detalles de la ciudad de Palmyra que han sido escogidos navegando por el video. ©Grand Palais.

El *Krak des Chevaliers* es un castillo fortificado situado en el oeste de Siria. Antes del conflicto, era considerado el ejemplo mejor conservado del desarrollo de la arquitectura militar del Medio Oriente, perteneciente a la época de las cruzadas.

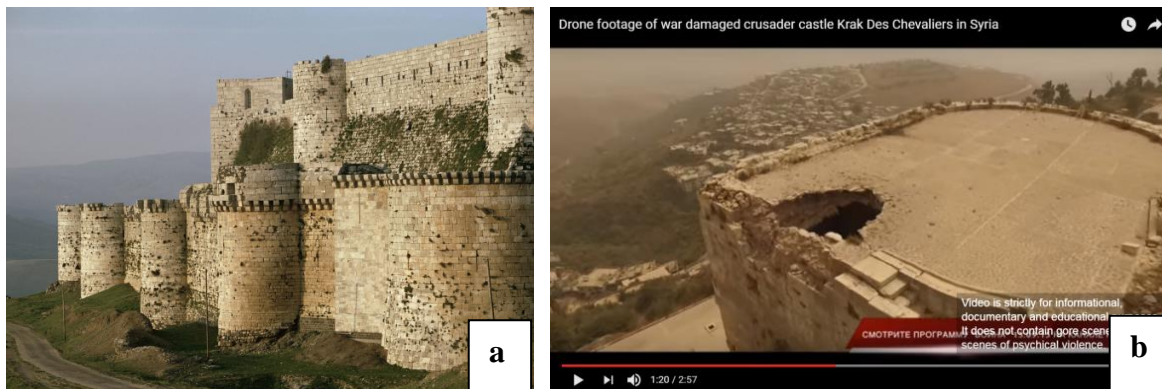


Fig. 160 El *Krak des Chevaliers*: a) Imagen del Castillo tomada en 2014. ©Rex Features; b) Un video de YouTube, en el que se empleó un dron para su realización, muestra el castillo en 2015. En la imagen puede apreciarse claramente uno de los numerosos daños causados por el conflicto. ©Rusia Insight.



Fig. 161 Modelo 3D creado con motivo de la exposición *Eternal Sites* que representa como era el castillo en su origen. ©Grand Palais.

La *Gran Mezquita Umayyad*, en el centro de Damasco, capital de Siria, es notable tanto por su arquitectura como por la suntuosa decoración de mosaicos.

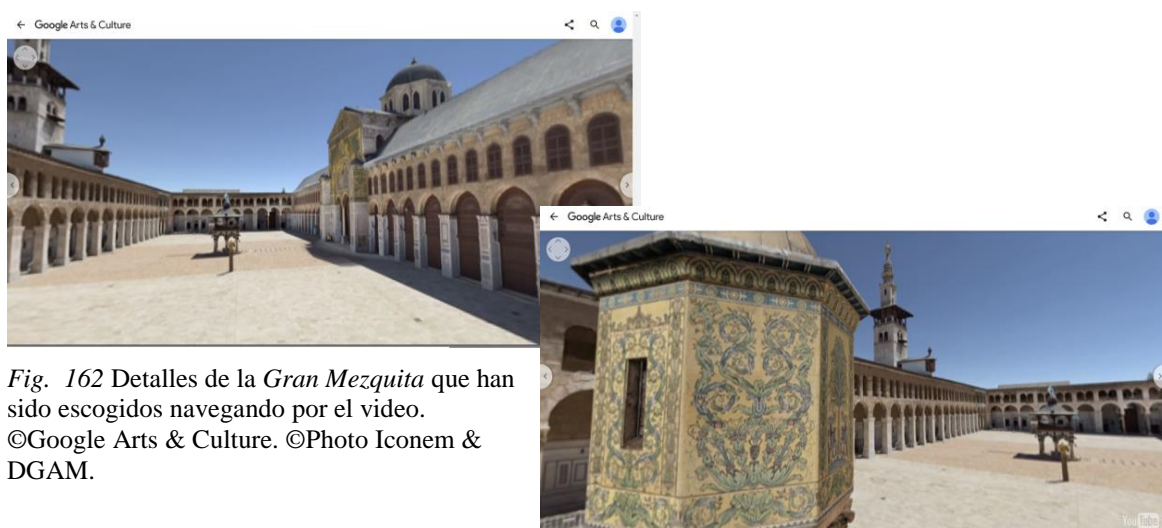


Fig. 162 Detalles de la *Gran Mezquita* que han sido escogidos navegando por el video. ©Google Arts & Culture. ©Photo Iconem & DGAM.

Khorsabad, complejo arqueológico al norte de Irak, donde en el 713 a.C el gran rey asirio Sharrou-ken fundó su nueva capital Dûr-Sharrukin, la *Fortaleza de Sargon*.



Fig. 163 Vista aérea del complejo arquitectónico de Khorsabad en el norte de Iraq. ©Iconem.

Por tanto, dada la fragilidad del patrimonio arqueológico, especialmente en zonas en conflicto, esta herramienta se presenta vital para su salvaguarda. En dichos objetos, el cambio y deterioro de la materia no solo viene dada por factores externos, sino que constituye una constante intrínseca en muchos casos (Stanco & Tanasi, 2011). Por ello, la implantación de un sistema de monitorización puede ser muy relevante para este tipo de bienes culturales, ya que se revelan los deterioros sin necesidad de realizar otro tipo de pruebas, en numerosas ocasiones destructivas.

Pueden mencionarse también los palacios del desierto de Jordania, que constituyen obras de arte únicas dispersas en el desierto como símbolo permanente de las antiguas civilizaciones. Los palacios más famosos de la región se encuentran en Jordania (*Kharanah, Amra, Azraq, Hallabat, Qastal, Mushatta, Tuba y Muaqqar*), Siria (*Qasr Al-Hayr Este, Qasr Al-Hayr Oeste y Palmyra*), Líbano (*Anjar*) y Palestina (*Khirbat Al-mafjar*). Varios de ellos se encuentran adyacentes a una carretera que conecta Jordania con Arabia Saudita e Irak,

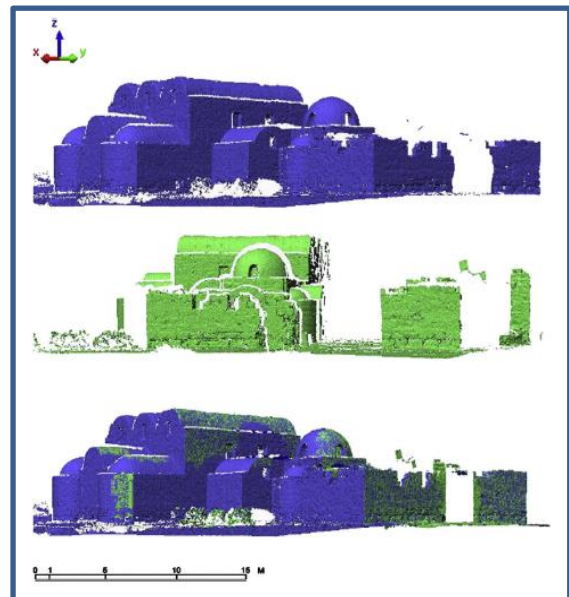


Fig. 164 Ejemplo de dos tomas registradas con el escáner en el *Palacio de Amra*. Abajo aparecen las dos tomas solapadas. ©Sharaf Al-khedera, Yahya Al-shawabkeha, & Norbert Haala.

por lo que la peor amenaza que sufren estos monumentos resulta de la vibración de los camiones que viajan a lo largo de la carretera. Este factor de deterioro se añade a otros que afectan notablemente al estado de conservación y sostenibilidad de los palacios, planteándose como urgente la necesidad de contar con un sistema de documentación 3D de cada lugar, que además tiene como fin posibilitar su correcta monitorización (Al-kheder, Al-shawabkeh & Haala, 2009, p.537-538). Bosworth (1996), afirma que los palacios Omeyas del Desierto de Jordania tienen un gran valor histórico por constituir los primeros monumentos islámicos que reflejan la adaptación de la dinastía Omeya a las tradiciones culturales helenísticas y sasánidas de la región (citado en Al-kheder et al., 2009, p.538). El proyecto llevado a cabo durante la década del 2000 requería un sistema de documentación para registrar y supervisar todas sus características externas e internas. Las labores de documentación en 3D realizadas en *Amra* y *Kharanah*, los palacios más relevantes de Jordania, consistieron en trabajar con escaneado láser, fotogrametría digital y técnicas SIG.

La documentación de este importante patrimonio es vital para proporcionar un completo plan de monitorización, protección y mantenimiento. La documentación digital en 3D de estos palacios, presenta, además, una gran importancia para los ámbitos de la conservación, la educación y las visitas virtuales, siendo de gran interés para los profesionales del patrimonio.

El proyecto descrito constituye solo una fase inicial, puesto que será ampliado en el futuro para documentar los palacios restantes de Jordania y constituir así un sistema de documentación completo (Al-kheder et al., 2009, p.545).



Fig. 165 Modelo 3D final obtenido del *Palacio de Amra*. ©Sharaf Al-khedera, Yahya Al-shawabkeha & Norbert Haala.

Capítulo 5. Restauración virtual y restauración tradicional apoyada por las tecnologías 3D

La restauración del patrimonio constituye realmente una disciplina conocida desde antiguo. La tendencia de la humanidad a proteger y conservar lo que le era valioso por numerosos motivos, ha ido cambiando a lo largo de la historia. En ocasiones el cambio ha venido determinado por la evolución del concepto de propiedad o bien por los cambios en los significados mágicos, religiosos, culturales y políticos atribuidos a sus producciones y pertenencias, lo que ha conllevado un sentido diferente en función del periodo histórico y las circunstancias del interés conservador (Macarrón, 2013, p.13).

Las metodologías empleadas para conservar y restaurar el patrimonio han evolucionado muy rápido en los últimos años y actualmente, por ejemplo, la documentación obtenida mediante el escaneado láser, fotogrametría digital o bien cualquier documento 3D que haya sido correctamente digitalizado, puede contribuir al desarrollo de una restauración de un original dañado. A lo largo del capítulo serán revisadas tanto las intervenciones realizadas de un modo virtual en su totalidad, como aquellas realizadas de manera física sobre el bien en las que las tecnologías 3D han intervenido.

5. 1 ¿Qué es la restauración virtual?

En el documento Los Principios de Sevilla (2011), que será revisado con mayor detalle en el capítulo 8 de la presente tesis doctoral, se define precisamente este novedoso concepto:

La restauración virtual comprende la reordenación, a partir de un modelo virtual, de los restos materiales existentes con objeto de recuperar visualmente lo que existió en algún momento anterior al presente. La restauración virtual comprende por tanto la anastilosis virtual.

El texto explica, además, que:

La reconstrucción virtual comprende el intento de recuperación visual, a partir de un modelo virtual, de un momento determinado de una construcción u objeto fabricado por el ser humano en el pasado a partir de las evidencias físicas existentes sobre dicha construcción u objeto, las inferencias comparativas científicamente razonables y en general todos los estudios llevados a cabo por los arqueólogos y demás expertos vinculados con el patrimonio arqueológico y la ciencia histórica.

Bernardi (2007) afirma que la restauración virtual ha extendido su ámbito de aplicación puesto que hoy el uso de técnicas de “Image Procesing” aplicadas a los bienes culturales se aplica a toda una serie de metodologías destinadas a restituir virtualmente los caracteres originales de una obra que de otro modo sería imposible (citado en Escriba y Madrid, 2010, p.15).

Los medios digitales posibilitan así el ensayo con modelos teóricos en un espacio hipotético, permitiendo la corrección de las propuestas a medida que los datos y la información de la obra aumentan, sin necesidad de intervenir directamente en ella (Macarrón y González, 2011, pp.135 y 136). De este modo, los registros pueden ser empleados para realizar una propuesta de intervención lo más adecuada posible sobre la obra.

Surgen, por tanto, las técnicas de restauración virtual, consistentes en aplicar los métodos de la restauración tradicional de manera virtual en los modelos 3D de los objetos y obras de arte a intervenir.

Estas restauraciones pueden posteriormente llevarse a cabo o no sobre el original matérico. En aquellos casos en que la restauración virtual sí se realiza, el previo estudio que sobre el modelo virtual se realiza conlleva una significativa disminución de los riesgos que la intervención pueda suponer al original, puesto que la intervención ha sido estudiada y “ensayada” antes de intervenir. En otras ocasiones, la restauración virtual no se lleva a cabo por numerosos posibles motivos, como por ejemplo su inviabilidad, porque los riesgos de intervenirla sean más altos que los que conllevan dejar la obra en el estado en el que se encuentra; también puede no abordarse la intervención por falta de recursos, etc. En estos casos, se consigue devolver el mensaje que la obra de arte emanaba al menos, de un modo virtual, por ejemplo, reintegrando y reconstruyendo las partes de las que carece con el objetivo de revalorizar el aspecto estético de la pieza para que esta recobre su sentido y se facilite la legibilidad de sus valores estéticos, todo ello, además, respetando su valor histórico y materiales originales.

De este modo, el mundo virtual se presenta como ayuda imprescindible para visualizar soluciones a la hora de enfrentarse a un trabajo de conservación-restauración. Así, se puede visualizar el posible aspecto de la obra ya restaurada o varias posibilidades sobre su intervención. Entre las ventajas que presenta la restauración virtual están la posibilidad de consenso entre los especialistas antes de emprender la restauración material de la obra favoreciendo incluso la concreción de un código deontológico más preciso y adaptable a cada caso (Escriva y Madrid, 2010, pp.15 y 18; Rodríguez Silgo, 2015, p.4).

Proyectar el resultado de una futura intervención es realmente útil también a efectos de la recepción social de las intervenciones. Un ejemplo podría ser la polémica que la restauración del *Pórtico del Paraíso* de la catedral de Ourense acarreó, que fue valorada por la ciudadanía como innecesaria y cuya reconstrucción cromática, sin duda alguna, transformó la lectura social que hasta el momento se hacía de la obra. La creación de un modelo 3D habría posibilitado, en este caso, una proyección pictórica sin la necesidad de intervenir el bien y conservando su estado previo (Rodríguez Silgo, 2015, p.4).

Además, no puede dejar de mencionarse el hecho de que los modelos 3D constituyen una valiosísima herramienta a la hora de conseguir subvenciones para

emprender los trabajos, proporcionando la seguridad a los inversores de un trabajo bien estudiado y con resultados óptimos (Escriva y Madrid, 2010, pp.15 y 18).

Sin embargo, no puede dejar de hacerse hincapié en que, a la hora de reconstruir virtualmente objetos y yacimientos, se deben tener en cuenta una serie de factores que facilitan tanto la investigación como la creación de una imagen creíble tanto para el espectador como para el investigador (Ángeles, 2010, p.311). Por ello, no debe pasarse por alto que, aunque se trate de restauraciones virtuales, es siempre necesario delimitar aquellos elementos que proceden de documentación certera y científica de los que constituyen hipótesis basadas en indicios. Para ello, debe determinarse el nivel de fidelidad de los datos que el visitante contempla mediante documentación escrita, que explique el proceso y el proyecto junto con las partes originales y aquellas hipotéticas identificándolas sobre el modelo, velando o coloreando los elementos hipotéticos añadidos en el modelo original, sobre un plano adjunto o bien sobre imagen adjunta equivalente (Gómez Robles, Quirosa y Fernández Ruiz, 2009, p.25).

Generalmente, el patrimonio que va a ser restaurado virtualmente, y muy especialmente en el ámbito de la arqueología, se encuentra con piezas dañadas o en muy malas condiciones de conservación, que, además, no son idénticas ni perfectas tal y como viene ocurriendo desde la industrialización. Estas suelen tener sus pequeñas particularidades que las hacen únicas, como sellos o marcas de punzones, por ejemplo, lo que conlleva la necesidad de tener en cuenta todos estos factores a la hora de reconstruirlas, dificultando el proceso notablemente (Ángeles, 2010, p.311).

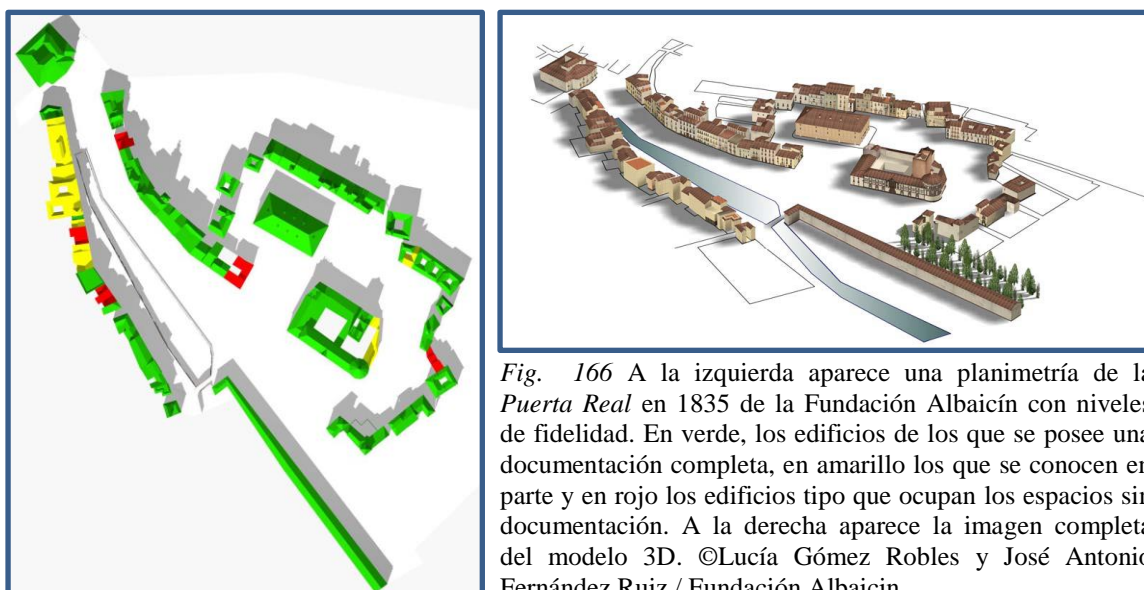


Fig. 166 A la izquierda aparece una planimetría de la Puerta Real en 1835 de la Fundación Albaicín con niveles de fidelidad. En verde, los edificios de los que se posee una documentación completa, en amarillo los que se conocen en parte y en rojo los edificios tipo que ocupan los espacios sin documentación. A la derecha aparece la imagen completa del modelo 3D. ©Lucía Gómez Robles y José Antonio Fernández Ruiz / Fundación Albaicín.

A pesar de que a lo largo del capítulo podrán verse ejemplos de estas delimitaciones, a continuación, se expone uno muy claro para esclarecer este punto, puesto que es fundamental que por parte del lector quede entendido.

Los autores Alfredo Grande y José Manuel Rodríguez Hidalgo (2010, p.112), del European Center for Innovation in Virtual Archaeology y del Laboratorio de Arqueología Virtual de la Universidad de Sevilla, respectivamente, llevan años escribiendo sobre la “hipótesis virtual arqueológica”, que definen como una hipótesis de naturaleza digital y desarrollo virtual. Esta es un conjunto de afirmaciones hipotéticas y consensuadas, que combinadas definen la propuesta virtual, total, parcial o fragmental de un bien del patrimonio arqueológico, en un espacio y tiempo determinado. La consecución de la hipótesis virtual es, para estos dos autores, el punto más importante y trascendental de la metodología o proceso virtual, puesto que de ella depende el resultado del proyecto.

5. 2 Técnicas de restauración virtual y empleo de las tecnologías 3D en restauración tradicional

A continuación, se desarrollarán las técnicas de restauración virtual donde intervienen las tecnologías 3D.

Es común que sin el empleo de estas técnicas la intervención física sobre el bien sea, cuanto menos, muy complicada; y tal y como se verá en los ejemplos citados a lo largo del capítulo, en ocasiones constituyen el único modo de mostrar el aspecto original del bien puesto que la intervención no puede actualmente llevarse a cabo.

5. 2. 1 La anastilosis y la anastilosis virtual

La palabra anastilosis (término anglosajón “anastylosis”), procede del griego ἀνά “hacia arriba” y στήλη “columna” y su sentido etimológico originario hace referencia al

levantamiento de columnas caídas de un edificio clásico. Sin embargo, con el tiempo, el término ha sido empleado también para nombrar aquellas operaciones en las que un edificio es reconstruido con sus materiales originales, que se encuentran caídos y dispersos en el mismo lugar donde el edificio se ubica (González-Baras, 2008, p.538). De este modo, actualmente el vocablo engloba también aquellas operaciones de reconstrucción de un objeto (no solo de un monumento o edificio), colocando en su lugar los elementos originales que se encuentren fragmentados; reincorporando a la estructura las piezas faltantes originales para completar las lagunas generadas. Al alcanzarse con éxito el proceso, la anastilosis completa la visión global del bien, facilitando su comprensión y estudio. Como bien es sabido por parte de conservadores y restauradores, pero, sobre todo, por arqueólogos, es muy frecuente que las obras se encuentren fragmentadas, lo que causa problemas y serias dudas en cuanto a su estudio y presentación (Tsiafaki, Koutsoudis, Arnaoutoglou & Michailidou, 2016, p.67).

La reconstrucción de un artefacto fragmentado es un proceso lento que tradicionalmente se viene realizando manualmente por especialistas del patrimonio como arqueólogos o restauradores. La metodología seguida comienza con un análisis visual de los fragmentos y el establecimiento de hipótesis sobre los fragmentos coincidentes, para posteriormente realizar el ensayo sobre las piezas adyacentes. La comprobación de parejas coincidentes es un paso crítico, ya que estas son a menudo frágiles y sujetan varias piezas (si no todo el conjunto reensamblado), por lo que es muy complejo de manejar. Los restauradores realizan esta acción ya sea pegando y fijando los fragmentos o bien construyendo estructuras de soporte específicas. Por otro lado, la fase de ensayo y evaluación no puede ser realizada considerando sólo un subconjunto de las piezas, puesto que se debe construir todo el rompecabezas para tener una visión global y una sólida evaluación de la hipótesis, complicando aún más las labores. Todo esto conlleva que el proceso de anastilosis tradicional suponga una tarea realmente compleja y que consume mucho tiempo (Scopigno, 2012, pp.112 y 113), a la par que se generan problemas y limitaciones en los métodos de investigación y presentación del objeto (Tsiafaki & Michailidou, 2015; Tsiafaki, 2012, citados en Tsiafaki et al 2016, p.68).

Al aparecer la posibilidad de generar modelos 3D de estos fragmentos y manipularlos con softwares de modelado 3D, surge la extraordinaria oportunidad de estudiar las partes fragmentadas de los bienes, sin necesidad de manipularlos físicamente.

Puede, por tanto, afirmarse que la anastilosis virtual se definiría como la recomposición de las partes existentes pero desmembradas en un modelo virtual (Principios de Sevilla, 2011) y tiene por objetivo que una estructura deteriorada sea (en un ámbito virtual) más comprensible, para lo cual se unen sus piezas o formas primitivas, empleando los archivos 3D de los materiales originales con los que se cuente. La técnica es factible de emplearse siempre y cuando no se dañe la disposición global y los valores del bien histórico (Bazeta y Rodríguez López, 2013, p.273).

De este modo, se pueden realizar combinaciones de la posición de las piezas, como si de un puzzle a encajar se tratase, barajándose tantas hipótesis como el especialista así lo requiera, hasta conseguir los resultados correctos. El avance y mejora que supone para el mundo de la conservación-restauración operar con fragmentos y piezas sueltas es inimaginable. Cuando se trata de piezas de tamaño reducido, como vasijas arqueológicas, vidrio o esculturas, los fragmentos pueden llegar a ser realmente pequeños y/o frágiles, lo que dificulta notablemente la capacidad de trabajar con ellos. Por el contrario, si la anastilosis va a ser realizada en monumentos y edificios, se facilita la manipulación de las partes fragmentadas, que suelen ser muy pesadas y de gran tamaño, llegando a ser necesario para su manipulación el empleo de maquinarias cuando no se emplea la tecnología 3D, resultando así manipulaciones altamente complejas.

A lo largo de la historia, las reconstrucciones de patrimonio destruido se han producido bajo intensos debates sobre la idoneidad de esta solución y los postulados que condicionan su realización (Dedalo Cultura, s.f.). Gracias a la restauración virtual, el debate puede ser argumentado con una mejora de la documentación y el estudio realizado sobre la obra, de modo que tomar la decisión sobre la realización o no de la intervención se base en fundamentos más investigados. A su vez, en caso de decidirse que la intervención no es apropiada, se puede obtener y divulgar el modelo virtualmente restaurado, que sirva para reintegrar la unidad estética del original e ilustrar su apariencia, respetando el estado del original, hasta que, tal vez, se decida lo contrario o surjan nuevas técnicas de restauración que puedan ser aplicadas sin que exista riesgo alguno para la obra.

Por tanto, la anastilosis, siempre que sea perfectamente justificada y documentada respetando la autenticidad, es un recurso eficiente que asegura el futuro de las piezas o monumentos (Bazeta y Rodríguez López, 2013, pp.277 y 278). Sin embargo, su actuación conlleva riesgos si esta no es aplicada con rigurosos estudios previos, durante

y después de la intervención, puesto que un error en la interpretación puede conllevar equivocaciones a la hora reconstruir el monumento, objeto, etc... y crear falsos históricos⁴⁵. Por tanto, cada vez se emplean más las técnicas 3D dado que permiten la obtención de modelos digitales muy precisos del elemento estudiado para su posterior análisis y estudio que conllevará la obtención de los documentos técnicos necesarios para su preservación, estudio y reconstrucción (Ageo, 2014).

La anastilosis virtual ha sido puesta en práctica en múltiples proyectos, especialmente en el reensamblaje de fragmentos de cerámica antigua, esculturas, frescos, bajos relieves, etc (Scopigno, 2012, p.113).

5. 2. 2 Reintegración volumétrica y cromática empleando las técnicas 3D

En este apartado debe establecerse una diferenciación entre la reintegración volumétrica y la reintegración cromática.

Se conoce como reintegración volumétrica a aquella intervención que tiene como objetivo recomponer la materia perdida, es decir, las faltas o pérdidas tridimensionales, en una obra de arte. Las reintegraciones volumétricas son muy comunes en esculturas de bulto redondo, pero también en relieves y bajorrelieves, en pintura sobre tabla, etc. Estas faltas pueden presentar distintas tipologías y morfologías, aunque todas ellas tienen en común la ausencia de la materia que en su día formaba parte de la obra de arte. Esta es una intervención muy común en los procesos de restauración y el empleo de la tecnología 3D puede ayudar notablemente al restaurador, puesto que manejando los convenientes programas de modelado 3D, el trabajo se agiliza y surge la posibilidad de crear diferentes hipótesis sin necesidad de gastar recursos e invertir en los materiales.

⁴⁵ En el mundo del patrimonio artístico se considera falso histórico el resultado de cualquier intervención tendente a la restitución del aspecto original de la obra. Si ante una intervención se pretende substituir al propio artista o suplantarlo, se está cometiendo un claro falso histórico. Este se refiere no tanto a la originalidad de la materia sino a los valores esenciales de la obra (González Moreno-Navarro, 2007, p.3).

Se debe realizar una diferenciación entre, por un lado, las intervenciones estructurales que son imprescindibles para la conservación del bien a tratar y, por otro lado, las pérdidas y alteraciones que dificultan la comprensión de lectura global de la obra. Aunque los materiales comúnmente empleados en estas intervenciones actualmente son considerados como respetuosos, por ejemplo, la madera de balsa, no dejan de ser elementos ajenos a la obra. El empleo de tecnologías 3D reduciría en muchos casos la tasa de intervención, puesto que con el modelo 3D o su facsímil restaurado podría contemplarse la obra sin necesidad de intervenir el original. Esto es fundamental para la conservación del bien, puesto que no se incorporan elementos ajenos que en un futuro podrían considerarse dañinos para la obra. Por ejemplo, hay que recordar cómo, a mediados del s. XIX, para muchos de los ensamblajes en piedra se empleaba el cemento, considerado actualmente uno de los medios de unión más dañinos (Rodríguez Silgo, 2015, p.6).

Por su parte, la reintegración cromática consiste en restituir las posibles faltas o laguna de la capa pictórica o de la policromía de una obra escultórica. Con esta intervención se trata de lograr una lectura no distorsionada de la obra sin caer en falsos históricos ni añadir a la obra matices subjetivos u originalidad del restaurador.



Fig. 167 En la imagen puede verse a la izquierda la máscara de la XVIII dinastía (1400 a.C.) y a la misma máscara, con la policromía restaurada virtualmente. Museo del Cairo. ©Mohamed Saleh.

A la hora de trabajar con patrimonio es siempre fundamental realizar colorimetría sobre el original, de modo que se conozcan los colores tal como se encuentran en el momento en que se llevaron a cabo las medidas de color, ya que este color puede influir en el proceso de catalogación y el estudio del estado de conservación, de la procedencia del hallazgo, etc. Con los programas de modelado 3D, como ZBrush y Blender, se pueden aplicar distintas tonalidades a los objetos previamente digitalizados, pero también es posible copiar el color de un objeto empleando su fotografía digital y aplicarlo al modelo

3D digitalizado, consiguiéndose mayor realismo. Así, los objetos, ya sean de cerámica, vidrio, bronce o hueso pueden ser reintegrados y pintados, una característica muy útil en patrimonio, ya que en ocasiones es necesario tener una amplia biblioteca de imágenes o mapas para texturizar que hay que tilear y mapear en las piezas para posteriormente renderizarlas. De este modo, la pintura y la escultura digital permiten crear texturas de forma libre sin tener que hacer uso de las bibliotecas externas que en ocasiones no aportan el realismo requerido por el proyecto. Las texturas, una vez creadas, pueden exportarse a otros programas y usarlas para mapear otros objetos (Ángeles, 2010, p.313).

5. 2. 2. 1 Reintegración volumétrica de obras de arte digital

No puede dejar de mencionarse en este capítulo las reintegraciones volumétricas realizadas en arte digital.

Para comenzar, ha de definirse el arte digital, que constituye una disciplina que agrupa todas las obras artísticas creadas con medios digitales. Estas obras artísticas recurren a las nuevas tecnologías como soporte (Lebrero, 2003, p.62) por lo que el mundo del 3D se encuentra muy ligado a la creación artística de sus autores.

Se dice que uno de los primeros antecesores del arte digital es el pintor neoimpresionista Seurat, al crear una nueva técnica que se asemeja notablemente con lo que más tarde llegarán a ser los píxeles.

Sobre este punto, el crítico Donald Kuspit señala la importancia que tuvieron estas manchas de color del impresionismo y neoimpresionismo con el puntillismo para llegar a concebir los píxeles. De este modo la idea de que una imagen esté creada por miles de puntos, tal y como ocurre en todas las imágenes digitales, tiene su antecedente en la

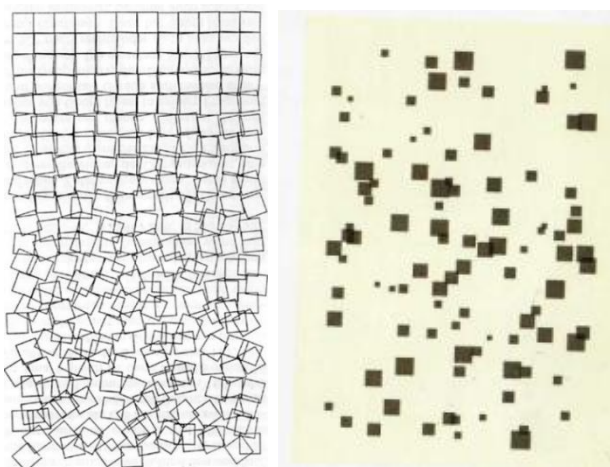


Fig. 168 Shooter y K38 Bandada, obras de George Nees creadas por computador. ©WordPress.com.

pintura neoimpresionista. Así el arte digital ha evolucionado notablemente desde sus orígenes a finales de los 40 cuando Max Bense, profesor de Filosofía y Teoría Científica en la Escuela Superior Técnica de Stuttgart, escribió la *Estética de la Información* junto a Abraham A. Moles. Este estudio realmente puede considerarse como uno de los textos más importantes en los orígenes del arte digital, ya que le serviría más tarde a George Nees para realizar la primera exposición, junto con Friedrich Nake y Michael Noll, sobre gráficos generados por computadora en 1965. La exposición se llevó a cabo en la Universidad de Stuttgart (Arturo, s.f.).

Muy diferentes a las obras de George Nees son las actuales obras digitales de Dmitry Rockstar, Alexander Kurkov, Jan Reeh, o el grupo Mecanique Generale Team, artistas que emplean programas de 3D para la realización de sus obras (Trazos, s.f.).

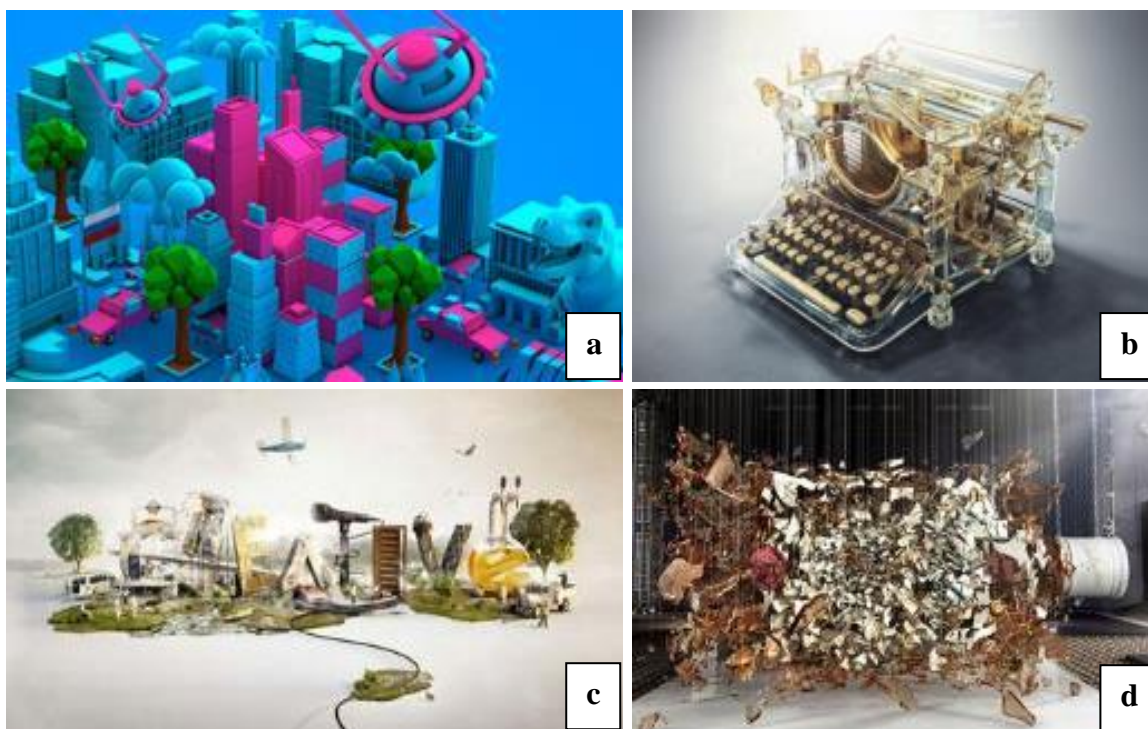


Fig. 1 Imágenes creadas con programas 3D. a) Dmitry Rockstar. ©Dimitry Morozoff; b) Alexander Kurkov. ©Alexander Kurkov; c) Jan Reeh. ©Jan Reeh.; y d) Mecanique Generale Team. © Mecanique Generale Team.

A continuación, son mencionados diferentes artistas para los cuales la tecnología 3D constituye la base de la creación de sus obras. La mención de estos casos constituye únicamente un mínimo que tiene por objetivo referenciar al lector sobre el panorama actual acerca de estas creaciones. Actualmente existen numerosas categorías del arte digital y cada vez surgen más puesto que la tecnología y la creatividad de los artistas que la emplean

en sus creaciones, parecen no tener límites. Sin embargo, para no desviar la atención del tema que concierne a la presente tesis doctoral, este apartado se va a centrar únicamente en aquellos artistas que emplean escáneres 3D y/o programas de modelado para la creación de sus obras, que posteriormente se materializan con impresoras 3D por ser las obras que en su condición de “objeto físico” realmente van a sufrir daños que deben ser restaurados. De este modo, la conservación del archivo que contiene la información referente a estas obras de arte es fundamental para, entre otros y en caso de que así sea necesario, posibilitar una intervención sobre la obra empleando las mismas técnicas que la materializaron, es decir, empleando las tecnologías 3D.

Sophie Kanh es una artista que emplea el escáner 3D para la creación de sus piezas y trabaja sobre los escaneados en programas de modelado 3D, para posteriormente imprimirlas. Sus obras son realmente espectaculares. La artista cuenta también con obra impresa en papel y numerosos videos.

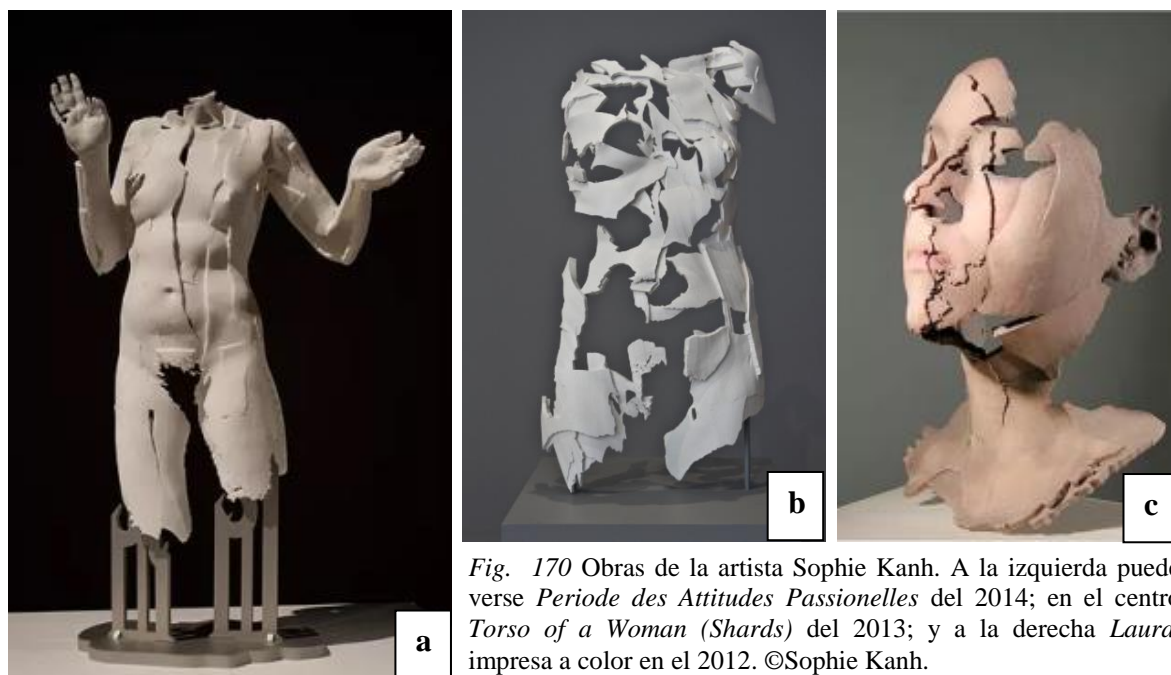


Fig. 170 Obras de la artista Sophie Kanh. A la izquierda puede verse *Periode des Attitudes Passionelles* del 2014; en el centro *Torso of a Woman (Shards)* del 2013; y a la derecha *Laura*, impresa a color en el 2012. ©Sophie Kanh.

La propia artista explica que la estética fragmentada de sus obras se debe a la interacción de nuevos medios con los viejos, digital y analógico. Combina la tecnología de vanguardia, como el escaneado láser 3d y la impresión 3d, con técnicas de fundición de bronce antiguo (Kanh, s.f.).

Otro artista contemporáneo a destacar es Mariano Guiraud, que actualmente desarrolla esculturas y objetos con el procedimiento de esculpido digital e impresión 3D.



Fig. 171 Obras de Mariano impresas en 3D. A la izquierda puede verse *Jaguar*, del 2011, y a la derecha *Mano*, del 2014. ©Mariano Guiraud.



El artista afirma que:

La relación entre la creación artística y la tecnología es algo natural. Hay tres tipos de relación con la tecnología: la que tienen las generaciones que nacieron antes de que existieran las computadoras, los que crecimos a medida que se iba desarrollando y los nativos. Mi crecimiento acompañó la evolución de las computadoras, entonces fue como una amiga. Fui creciendo y me pareció lo más natural utilizarla (Guiraud, 2014).

También emplea las nuevas tecnologías el artista Richard Dupont, que trabaja con la distorsión de la realidad a partir de la misma realidad. Para ello se escanea a sí mismo y se imprime varias veces con diferentes distorsiones con el fin de crear un cuerpo humano configurado como un elemento extraño y ambiguo para el espectador (Espinell, 2016, p.32).



Fig. 172 Obra *Sin título 8* (2008), de Richard Dupont. ©Dupont, R.

La obra de arte de mayor tamaño impresa en 3D hasta la fecha está fabricada por cientos de personas de todo el mundo, que han participado imprimiendo cada uno desde su propia impresora 3D uno de los singulares ladrillos que lo constituyen. El proyecto EGG fue creado por el diseñador holandés Michiel Van der Kley y se llevó a cabo entre septiembre de 2013 y agosto de 2014 y se trata de un habitáculo en forma de huevo gigante compuesto por 4.760 piezas únicas y diferentes. Los materiales utilizados son PLA y tornillos de metal (Fundación Telefónica, 2017, p.13).

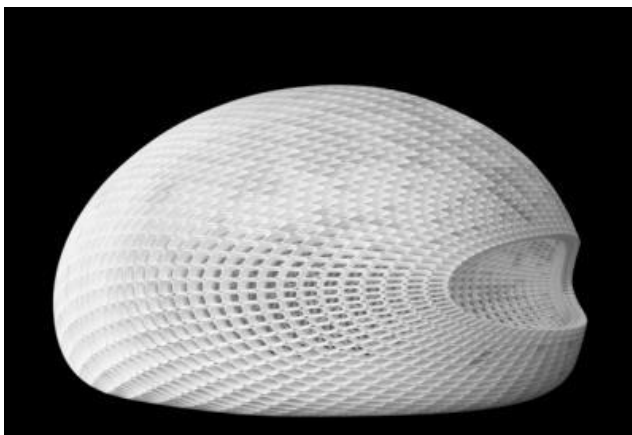


Fig. 173 Michiel Van der Kley. *Project EGG*, 2014. ©Fundación Telefónica / Michiel Van der Kley.

Anish Kapoor es uno de los escultores más influyentes de su generación. Expone en todo el mundo y su obra se encuentra presente en numerosas colecciones, tanto privadas como públicas, incluyendo la Tate Gallery, el Museum of Modern Art de Nueva York, el Reina Sofía de Madrid y el Stedelijk Museum de Ámsterdam. Kapoor ve su trabajo como un compromiso con polaridades metafísicas fuertemente enraizadas: presencia y ausencia, ser y no ser, lugar o no lugar y lo sólido y lo intangible (Factum Arte,s.f. a).

Anish Kapoor y Factum Arte llevan trabajando juntos desde hace varios años en el desarrollo de la impresión de cemento con el fin de investigar sobre nuevas maneras de generar formas. Para ello Factum construyó una impresora 3D para cemento que puede imprimir directamente desde archivos digitales CAD. Así en 2009 las esculturas creadas con esta técnica que combinan intención con azar y las propiedades en directo de las diferentes mezclas de cemento se mostraron por primera vez al público y lo hicieron en la London Royal Academy (Factum Arte s.f. b).

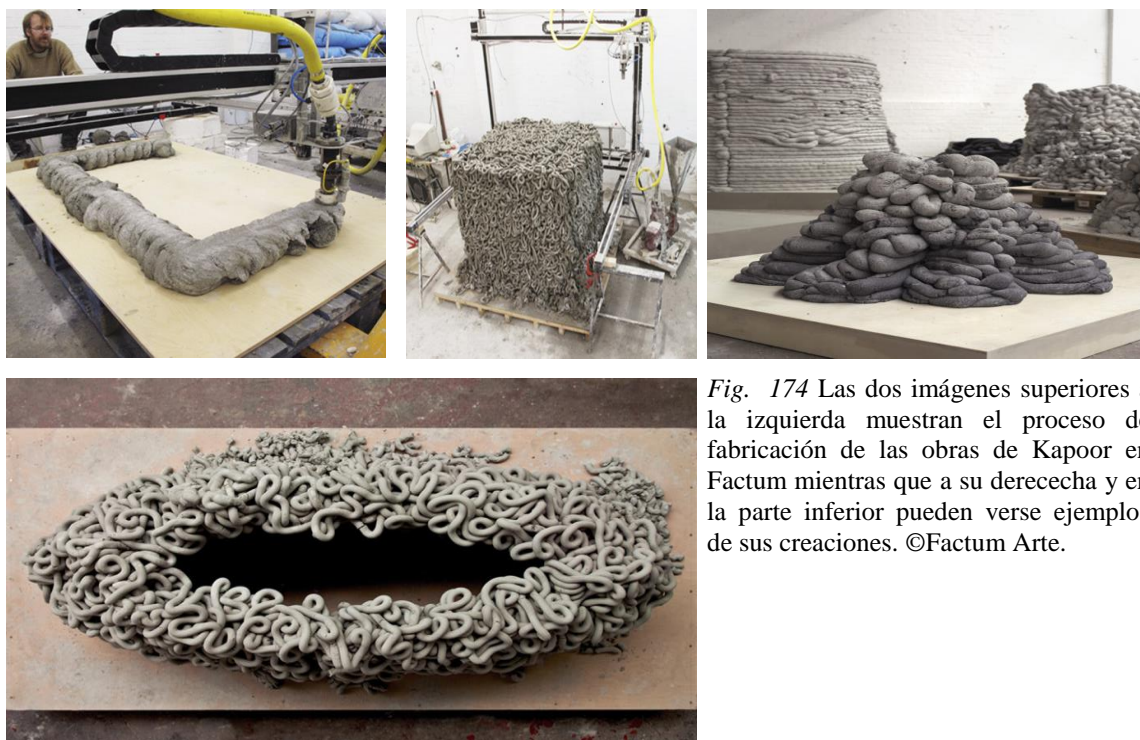


Fig. 174 Las dos imágenes superiores a la izquierda muestran el proceso de fabricación de las obras de Kapoor en Factum mientras que a su derecha y en la parte inferior pueden verse ejemplos de sus creaciones. ©Factum Arte.

Estas obras son aún muy recientes y presentan un buen estado de conservación, pero por parte de los conservadores y restauradores, e incluso de los propios artistas, cada vez es más frecuente que surjan dudas como ¿Hasta cuanto presentaran ese buen estado? ¿Cómo conservar y ralentizar el envejecimiento de sus materiales? ¿Una vez dañadas, se vuelven a imprimir de nuevo o por el contrario se restauran e intervienen como el resto de obras tradicionales?

Desafortunadamente desde el punto de vista de la conservación estos materiales apenas han sido investigados y cada vez queda más clara la urgente necesidad de realizar estudios de estabilidad a largo plazo (Coon, Pretzel, Lomax & Strlič, 2016, p.1), por lo que el arte contemporáneo es hoy más que nunca un desafío importante para los especialistas ya que existe una importante falta de metodologías de conservación y restauración establecidas que puedan abordar con seguridad la degradación, a menudo extremadamente rápida, de los materiales utilizados por los artistas contemporáneos. Por ello la Unión Europea ha financiado por medio del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 un proyecto llamado *NANORESTART* que se centra en la síntesis de nuevos nanomateriales poli-funcionales y en el desarrollo de técnicas de restauración altamente innovadoras con el fin de abordar la conservación de una amplia variedad de materiales

utilizados principalmente por artistas modernos y contemporáneos (Nanorestart, 2015). Como parte del proyecto el equipo ha creado una obra de arte impresa en 3D sobre la que ensayar métodos de restauración que servirán para estudiar la degradación de estas estructuras e idear técnicas que las conserven en mejor estado. La escultura impresa en 3D, *Out of the Cauldron*, ha sido diseñada por el artista e ingeniero Tom Lomax, escultor y pintor británico especializado en esculturas a color impresas en 3D. Su construcción se realizó mediante tecnologías de prototipado rápido más comunes de última generación, las cuales cobran cada vez más popularidad entre diseñadores y artistas y el archivo correspondiente puede descargarse gratuitamente (Imprimalia 3D, 2017).



Fig. 175 Imágenes de la obra *Out of the Cauldron* de Tom Lomax producida con las tecnologías RP más comunes: estereolitografía (SLA), polyjet, impresión 3D (3DP) y sinterización láser selectiva (SLS). En la parte superior aparecen las obras antes de someterse a la fotodegradación y en la parte inferior después. ©Carolien Coon, Boris Pretzel, Tom Lomax & Matija Strlič.

Estos experimentos formaron parte de una investigación del University College de Londres (UCL) titulada *Preserving Rapid Prototypes: A Review* y publicada a finales del 2016 en la revista *Heritage Science*. La investigación identificó las tecnologías y los polímeros de impresión 3D más empleados por artistas y diseñadores gracias a la colaboración de artistas y diseñadores que utilizan estas tecnologías. Todos ellos respondieron a las mismas preguntas que despejaban las dudas acerca de: las principales tecnologías y materiales de prototipo rápido empleados, los problemas relacionados con archivos digitales, software y hardware, los problemas relacionados con el envejecimiento de las impresiones y las actitudes tomadas en referencia tanto a la autenticidad y la reproducción de obras de arte como a la conservación. Estas cuestiones se presentan fundamentales puesto que las obras de estos artistas y diseñadores empiezan, cada vez con mayor frecuencia, a formar parte de las colecciones de museos y dado que las piezas y obras suelen ser postprocesadas de forma exclusiva, a menudo se convierten en

irremplazables y eso implica que no puedan simplemente ser reimpresas. De hecho, el estudio concluyó que los artistas y diseñadores priorizan la conservación de la impresión física sobre el archivo digital lo que destaca la importancia de preservar la obra de arte física. A partir del proyecto además quedó claro que existen importantes lagunas en la caracterización de materiales de prototipado rápido y la investigación de conservación. Los polímeros empleados en las tecnologías RP representan un mayor desafío para la conservación por lo que el estudio se centró específicamente en las cinco tecnologías en las que se utilizan polímeros como materiales base más empleadas: SLA, FDM, 3DP, SLS y polyjet.

Hasta entonces, la mayoría de las investigaciones se habían centrado en las propiedades mecánicas de los materiales y productos de RP y pocos son los estudios ocupados de estudiar la degradación a largo plazo de RP salvo uno relacionado con la estereolitografía y otro con la estabilidad del color de las impresiones en 3D. Los resultados demuestran la inestabilidad de los polímeros base, así como de los aditivos tales como los colorantes, de los cuales se desconoce cómo afectan a la estabilidad fotoquímica de los productos. Por su parte el ácido poli (láctico) ha ganado popularidad en la composición de los materiales FDM y SLS debido a su biodegradabilidad, que se traduce en un beneficio en términos de impacto ambiental, sin embargo, en contrapartida es causa potencial de problemas de conservación aún más complejos que los que presentaban los predecesores materiales (Coon et al., 2016).

Tal y como se ha visto gracias al proyecto *NANORESTART*, es altamente probable que en un próximo futuro las obras de numerosos artistas no presenten el deseado estado de conservación. La degradación de los materiales que constituyen estas obras impresas puede acarrear numerosos daños en su estructura, que pueden a su vez desencadenar, por ejemplo, la rotura de piezas al disminuir la resistencia mecánica de la estructura. En caso de que esto ocurra, y la pieza no pueda ser de nuevo colocada en su lugar, bien sea por pérdida o por el propio estado de conservación, la restauración puede recurrir a la misma tecnología que la creó imprimiendo de nuevo esa parte para adherirla, sin embargo, es preciso realizar un mayor número de estudios para poder realizar las intervenciones con la mayor seguridad posible.

Otro trabajo muy interesante que sigue esta línea, es la tesis realizada por Maja Stanić (2010): *Structure, surface and permanence properties of three dimensional printing*

materials. El objetivo de la investigación fue caracterizar la estructura y definir la permanencia y estabilidad de los materiales de impresión 3D mediante la aplicación de microscopía seleccionada, métodos espectrofotométricos, métodos de análisis de imágenes, métodos de evaluación de superficies, ensayos mecánicos y métodos de prueba de permanencia. Las muestras para la investigación y la parte experimental se realizaron en materiales básicos para la impresión 3D (materiales inorgánicos y orgánicos en forma de polvo) y en impresiones 3D. Teniendo en cuenta la estructura de las impresiones 3D, sus propiedades de superficie y mecánicas, Stánic mostró un exhaustivo estudio de materiales de inyección de tinta en 3D e impresiones específicas utilizando métodos de caracterización existentes y personalizados. El trabajo explicó la variedad de las características de los materiales y las impresiones de chorro de tinta 3D, incluyendo datos sobre la estructura, permanencia y estabilidad del color, además de los efectos del envejecimiento acelerado en las propiedades mecánicas.

5. 2. 3 Reconstrucciones virtuales en patrimonio

El mayor número de ejemplos de restauraciones virtuales se encuentra en el campo de la arqueología, sobre todo con la realización de reconstrucciones. Estas permiten interpretaciones mucho más claras y didácticas que los métodos tradicionales, por lo que la revalorización de los yacimientos es mayor (Escriba y Madrid, 2010, p.18). Además, las reconstrucciones de yacimientos en 3D permiten a los arqueólogos desarrollar una mejora en el entendimiento y análisis de las zonas y artefactos excavados (Forte, 2014, p.123).

También la técnica de restauración digital de objetos arqueológicos es ampliamente empleada y centra sus objetivos en la interpretación y difusión del conocimiento arqueológico. Esto se debe al potencial que las restauraciones virtuales presentan a la hora de restar a los bienes arqueológicos los efectos destructivos de agentes atmosféricos, contaminación, del tiempo y en algunos casos, de los desastres naturales y las guerras. Las restauraciones digitales permiten devolver la integridad artística y conceptual de monumentos y objetos (Stanco & Tanasi, 2011, p.18).

Tal y como ha sido indicado anteriormente, es frecuente que en numerosos proyectos que tienen como objetivo reconstruir arquitecturas, existan demasiadas trabas (económicas, retraso en los permisos de las obras o simplemente logísticas, entre otras), que impiden su realización. Por ello, las reconstrucciones virtuales son muy empleadas para el estudio e intervenciones de este tipo de bienes. Las reconstrucciones virtuales, por tanto, se emplean con frecuencia y pueden tener diferentes objetivos, además de aportar grandes beneficios a las investigaciones.

El Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico (2011) indica que la reconstrucción virtual:

Permite generar un modelo virtual de una entidad patrimonial en un contexto histórico concreto, en base al análisis histórico y a una serie de hipótesis científicas contrastadas. En el caso de los bienes inmuebles, permite una visualización fotorrealista y una navegación en un entorno tridimensional. Es posible utilizar este método de reconstrucción como un medio muy intuitivo para la divulgación del patrimonio, tanto el existente como el desaparecido o alterado.

Este tipo de aplicación es la que permite rebasar más claramente los límites históricos del objeto de estudio (Escriba y Madrid, 2010, p.15).

En este capítulo, la atención se centrará únicamente en aquellas reconstrucciones, en su mayoría, del patrimonio arquitectónico y/o arqueológico que debe ser restaurado, del cual existen, por tanto, ruinas y restos de lo que en su día fue el bien. Esto es debido a que, atendiendo a la definición dada por el ICOM (2008) de la restauración en su método tradicional, puede afirmarse que:

La restauración son todas aquellas acciones aplicadas de manera directa a un bien individual y estable, que tengan como objetivo facilitar su apreciación, comprensión y uso. Estas acciones sólo se realizan cuando el bien ha perdido una parte de su significado o función a través de una alteración o un deterioro pasados. Se basan en el respeto del material original. En la mayoría de los casos, estas acciones modifican el aspecto del bien.

Recreaciones y reconstrucciones virtuales en muchos casos se consideran términos sinónimos. Sin embargo, se considera que existen diferencias claras entre las intervenciones que reconstruyen para restaurar un bien a partir de restos del mismo y aquellas que lo hacen a partir de documentación y fotografías existentes, puesto que en estas últimas se están recreando hipótesis más o menos verídicas dependiendo de la información con la que se cuente, y no son, se reitera una vez más, intervenciones de restauración.

Una vez esta diferenciación ha sido esclarecida, puede pensarse que estas reconstrucciones han comenzado a desarrollarse hace pocos años, sin embargo, a pesar de ser reciente su generalización en proyectos de patrimonio, llevan ya un par de décadas empleándose.

5. 2. 4 Restauración virtual de fósiles

Durante la fosilización, los restos de los organismos se someten a diferentes procesos químicos que conllevan la aparición de, desde pequeñas roturas y grietas, desarticulaciones y fragmentaciones, hasta la pérdida y deformación de estructuras esqueléticas y otras partes duras. Por ello, cuando se produce su hallazgo, los fósiles suelen estar incompletos y deformados. La restauración de los mismos en ocasiones solo retarda el momento en el que desaparecerán por completo, puesto que si bien estos se han conservado durante millones de años, el propio suceso de su afloramiento, ya sea accidental o como consecuencia de una excavación planificada, puede conllevar la desaparición progresiva de los mismos. Esto se debe a que su hallazgo les supone un cambio dramático de las condiciones de presión, temperatura, humedad, insolación, etc., con respecto a aquellas que han favorecido su permanencia en el sustrato geológico durante millones de años. A pesar de que las técnicas de restauración de fósiles permiten aumentar la información visible que a simple vista revelan los restos fósiles, no es posible saltarse determinadas limitaciones físicas de la materia mineral en la que se han convertido los huesos tras millones de años. Dado que la morfología preservada de los fósiles suele constituir la base de investigaciones paleontológicas, estos daños suelen constituir un problema considerable, sobre todo en

aquellos especímenes que ya se han extinguido y que solo gracias a sus fósiles pueden hoy estudiarse. Gracias a los avances en la tecnología 3D, se han creado nuevas herramientas versátiles para el estudio de los fósiles de organismos tanto extintos como existentes y la imposibilidad de estudiar al completo los huesos más deformados está disminuyendo notablemente, llegando incluso a desaparecer en algunos casos. Por ello, actualmente se está implantando otro tipo de conservación que complementa a la tradicional: la conservación digital, mediante la cual se puede restituir la morfología original de un hueso deformado. Por ello en los últimos años puede verse como ha aumentado el uso de técnicas digitales en la investigación de paleontología, aunque, hasta hace poco, la restauración de material fósil se realizaba físicamente empleando fotografías, dibujos y modelos de yeso. Además, las restauraciones anatómicas se han realizado muy raramente en paleontología de vertebrados y los criterios, limitaciones y protocolos que se han aplicado en la restauración de estos fósiles son a menudo poco claros. A pesar de que actualmente la complejidad de los procesos de restauración de los fósiles puede introducir cierto grado de interpretación, los fósiles restaurados digitalmente proporcionan información morfológica útil y abren posibilidades para la educación y la investigación (Alcalá, 2014; Lautenschlager, 2016, pp.1-4).

Para comenzar con la restauración virtual de un fósil, tal y como ocurre con el resto de patrimonio, debe obtenerse el modelo 3D de este. El método más empleado para la digitalización es el escaneado del fósil mediante CT-Scan, es decir tomografía computarizada, que garantiza el acceso a las partes ocultas del mismo (ver capítulo 9) (Riesco, 2017, p.17). Como alternativa a los métodos tomográficos, es también factible el empleo del escáner 3D. Sin embargo, estos no son capaces de capturar las estructuras internas por lo que son únicamente empleados para estudios en los que sólo se requiere información sobre la morfología externa. La fotogrametría constituye otra alternativa fácil de usar y rentable (Lautenschlager, 2016, pp.4 y 5).

De este modo, una vez se han seccionado y obtenido el modelo 3D de los restos fósiles, se trabaja con ellos en programas de modelado para postprocesarlos y aplicar técnicas de reconstrucción y restauración digital que ofrecen una gran variedad de enfoques para restaurar la morfología original. El doctor Stephan Lautenschlager, paleontólogo de vertebrados de la Universidad de Birmingham, describe en su artículo

Reconstructing the past: methods and techniques for the digital restoration of fossils las intervenciones más comunes que se realizan a la hora de restaurar un fósil (Lautenschlager, 2016, pp.5-13). En el artículo detalla cómo y con qué herramientas de programa 3D (Blender, Avizo⁴⁶, Geomatic Studio, Meshlab, etc.) debe realizarse cada una de las intervenciones:

1. Eliminación de fisuras y grietas. Los fósiles presentan habitualmente multitud de pequeñas grietas, roturas y orificios resultantes del proceso de fosilización, la propia excavación y su manipulación tras la misma.

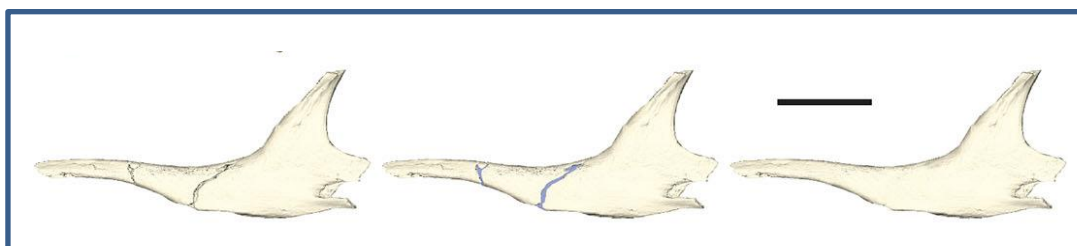


Fig. 176 Eliminación de roturas y grietas en los datos obtenidos por TC. La imagen de la izquierda muestra la representación digital de un hueso tal y como se conservó originalmente. En el centro, las fisuras rellenadas en el proceso de restauración virtual y, por último, a la derecha, el hueso totalmente restaurado. ©Stephan Lautenschlager.

2. Reemplazamiento de los elementos faltantes aplicando la herramienta incluida en los programas de reflejo o espejo. El elemento faltante no puede simplemente ser duplicado o clonado puesto que se ha de invertir el eje de simetría de este, siendo por tanto necesaria dicha herramienta.

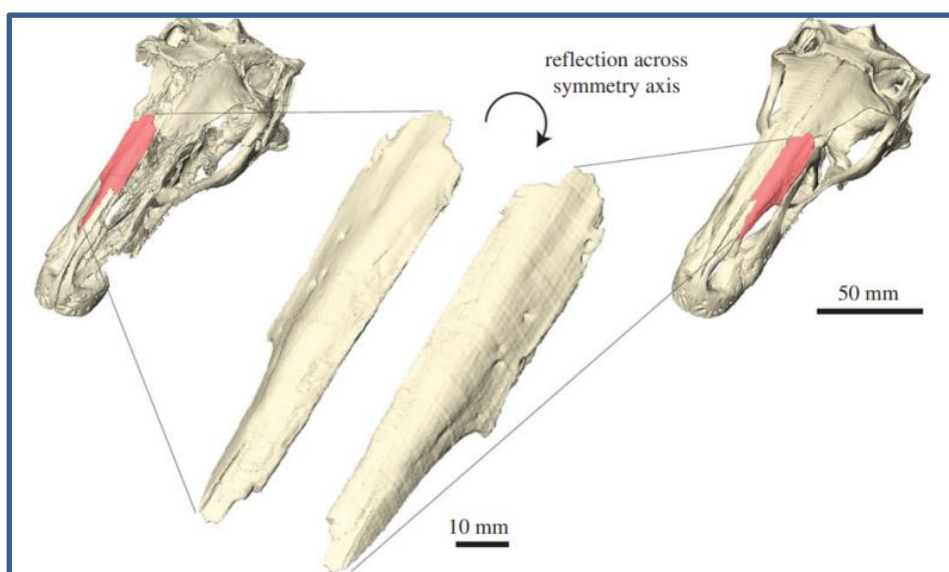


Fig. 177 Aplicación de la herramienta de espejo en un elemento faltante. De este modo el elemento se ha duplicado siendo reflejado a partir del eje de simetría que ha sido previamente ajustado en el cráneo restaurado. ©Stephan Lautenschlager.

3. Superposición de elementos. Sin embargo, para los fósiles que no tienen una contraparte bilateralmente simétrica no se puede emplear la reflexión. En estos se unen los elementos y como resultado se crea un modelo más completo. Antes de que se puedan superponer dos o más elementos incompletos, debe comprobarse que todos los fragmentos están en escalados al mismo tamaño.
4. Reposicionamiento de elementos. El termino reposicionamiento se emplea en este contexto como reensamblaje de partes rotas o desarticuladas de un fósil.

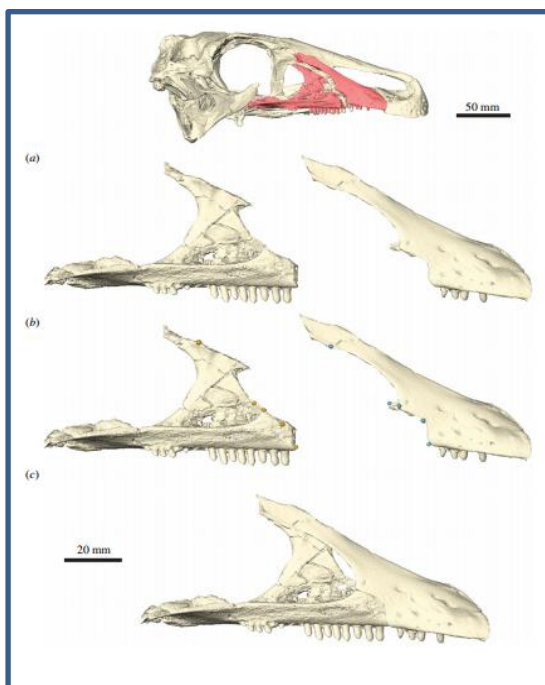


Fig. 178 Reposicionamiento de elementos empleando puntos de referencia. a) Fragmentos separados y dislocados; b) puntos de referencia de la unión a lo largo del borde de rotura señalados en los fragmentos; c) fragmentos reposicionados por superposición de los elementos. ©Stephan Lautenschlager.

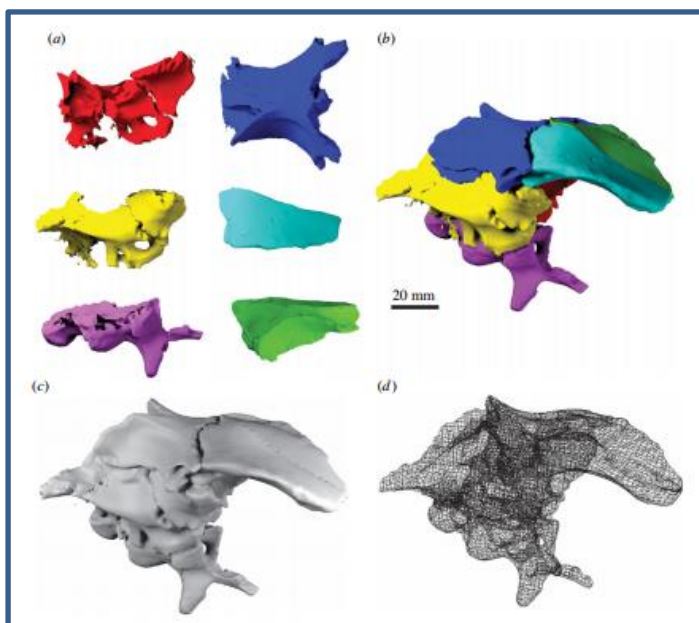


Fig. 179 Reposicionamiento manual de elementos. a) Modelos de elementos desarticulados obtenidos por tomografía computarizada y fotogrametría; b) piezas unidas conformando el hueso completo; c) modelo remodelado y d) malla poligonal del modelo. ©Stephan Lautenschlager.

5. Duplicado de elementos. En estos casos la duplicación tiene como objetivo reproducir o reemplazar elementos que se repiten en serie, pero no tienen necesariamente que ser simétricos, por lo que no se emplea el espejo.

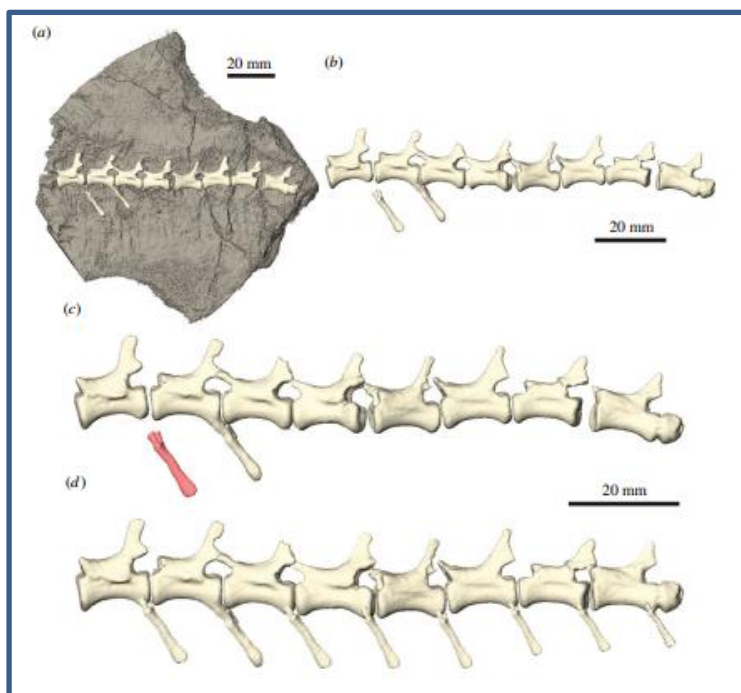


Fig. 180 Duplicado de elementos. a) Serie de vértebras y huesos de cheurón aislados parcialmente incrustados; b) vértebras y huesos extraídos virtualmente; c) hueso de cheurón aislado usado como plantilla para duplicación; d) huesos de cheurón duplicados y modificados, puesto que para completar la serie y que encajasen correctamente debieron ser escalados y rotados. ©Stephan Lautenschlager.

6. Retrodeformación. Como ha podido observarse, la distorsión de los fósiles es un problema común en la paleontología que en posteriores estudios puede dar lugar a resultados erróneos. La retrodeformación es el proceso de restaurar la forma original del fósil calculando la proporción de la deformación y aplicándola sobre el modelo a la inversa, con el fin de eliminar las distorsiones.

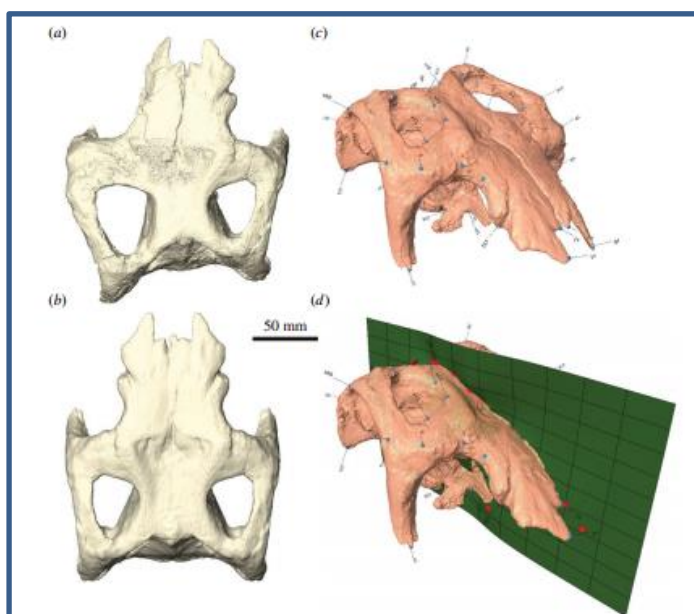


Fig. 181 Retrodeformación. a) Vista dorsal de un fósil mostrando su deformación; b) retrodeformación obtenida tras el empleo de (c) multitud de puntos de referencia para el (d) cálculo del plano de simetría en el que se retrodeforma el fósil. ©Stephan Lautenschlager.

7. Extrapolación. Los fósiles están a menudo tan mal conservados, que las partes que faltan no pueden ser reemplazadas empleando la herramienta de espejo ni duplicando elementos, puesto que estos también presentan un mal estado de conservación. En este caso, las porciones que faltan tienen que ser extrapoladas, lo que puede hacerse empleando información de otros especímenes de la misma especie (ver capítulo 9), de diferentes especies o bien estimando la morfología de las regiones faltantes a partir de la base de las partes preservadas.

5. 3 Ejemplos de restauraciones realizadas en patrimonio empleando tecnologías 3D

En este apartado van a describirse en detalle aquellas restauraciones realizadas de un modo físico que apoyaron sus estudios y metodologías en las técnicas 3D.

5. 3. 1 Ejemplos de anastilosis virtual

Un importante ejemplo de anastilosis virtual, utilizada como apoyo a las técnicas tradicionales es la intervención realizada por el Metropolitan Museum sobre la escultura de mármol *Adam*. La obra fue realizada alrededor de 1490 por el escultor Tullio Lombardo para que formase parte de la tumba monumental de Andrea Vendramin (1393 - 1478), el entonces dogo de Venecia (Syson & Cafá, 2014, p.9). La obra forma parte de la colección permanente del Metropolitan desde 1936 y es muy relevante para el museo, puesto que constituye una de las pocas obras maestras del Renacimiento que se encuentran fuera de Italia, hecho poco común (The Metropolitan Museum of Art, 2014).

El domingo 6 de octubre de 2002, el pedestal que soportaba la obra colapsó, y la obra se precipitó e impactó directamente contra el suelo, rompiéndose en veintiocho piezas y cientos de pequeños fragmentos. La escultura cayó sobre su lado derecho, y la fuerza del

impacto contra el suelo de piedra fue tan grande, que algunos de los fragmentos se desplazaron considerables distancias, y sólo fueron detenidos por las propias paredes del patio. Por ello, dado que los conservadores del museo esperaban que el patrón de las dispersiones de los fragmentos en el suelo pudiera ayudar a señalar su ubicación en la escultura, desarrollaron un mapa sistemático y un sistema de recuperación para documentar la posición de cada fragmento (Riccardelli et al., 2014, p.50). Automáticamente, Carolyn Riccardelli, conservadora del Metropolitan, documentó todo, como si de la “escena del crimen” se tratase, tal como afirma en un video que puede verse en la página del Museo donde se explica el proyecto. Trazaron una cuadrícula numerada del suelo y realizaron fotos de cada uno de los cuadrados y fragmentos, que una vez convenientemente fotografiados y numerados, fueron recogidos y salvados sin excepción alguna (The Metropolitan Museum of Art, 2014).

Todo el proyecto fue publicado en *The Treatment of Tullio Lombardo's Adam: A New Approach to the Conservation of Monumental Marble Sculpture* en el *Metropolitan Museum Journal*, nº 49 (Riccardelli et al., 2014). Una vez los fragmentos habían sido convenientemente documentados, se recogieron y se procedió a examinarlos y planificar su reconstrucción. En ese momento quedó claro el alcance de los daños, de modo que, ante la imperiosa necesidad de restaurar la obra lo antes posible, el museo emprende, casi de inmediato, un proyecto multidisciplinar, en el que trabajaron conservadores, restauradores e ingenieros con el fin de determinar el mejor tratamiento para la escultura que le devolviese su aspecto original, en la mayor medida posible.



Fig. 182 *Adam* de Tullio Lombardo, 1490-95. Mármol de Carrara marble, 191.8 cm. The Metropolitan Museum of Art. Fotografía de 1985 tomada por Schecter Lee 1985. ©Luke Syson & Valeria Cafá.

El paso inicial consistió en retirar fragmentos internos, dado que era poco probable se empleasen en la restauración. El equipo observó que su incorporación produciría desajustes en las uniones exteriores mientras que los vacíos causados por su ausencia podrían ser rellenados con apropiados materiales de conservación. Por otra parte, a falta de cualquier superficie externa, se contaba con pocas o ninguna pista acerca de su ubicación original en la escultura.

En cambio, la alineación de los fragmentos externos era de suma importancia, por lo que el equipo de profesionales focalizó sus esfuerzos hacia la localización de esas piezas.

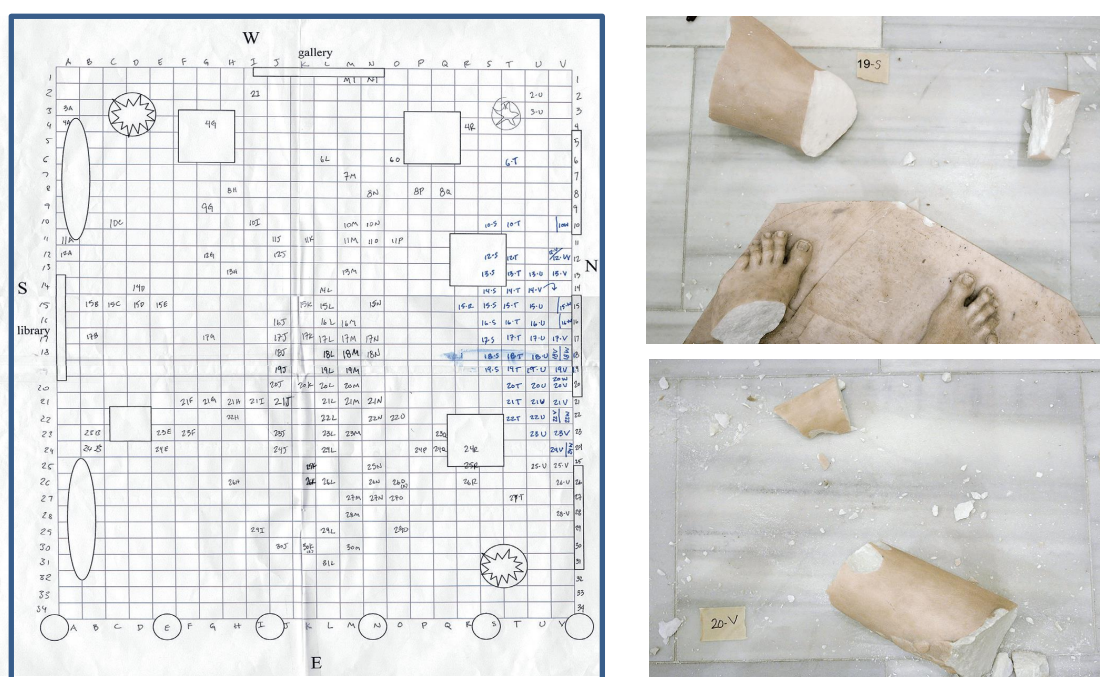


Fig. 183 La imagen de la izquierda hace referencia al mapa del Patio Vélez Blanco indicando las ubicaciones de los fragmentos. El patrón de azulejos del patio se utilizó para crear la cuadrícula, que nombró de la “A” a la “V” en el horizontal y en el vertical se numeró de 1 al 34, por lo que a cada fragmento se le asignó un número y una letra conforme a su ubicación. Incluso aquellos fragmentos de menor tamaño fueron marcados de acuerdo a sus coordenadas. A la derecha puede observarse la documentación fotográfica para registrar la dispersión de los fragmentos. Para ello, fue fotografiada cada baldosa del suelo. ©Carolyn Riccardelli

El proceso fue extremadamente laborioso y durante años se examinaron los cientos de fragmentos, tomando nota de la forma externa y tridimensional, color, inclusiones o veteados y marcas de herramientas. Resultaba muy complicado hallar el orden para conectar los fragmentos, y a menudo llevó años reorganizar cualquier área con sus componentes. La compleja naturaleza de las fracturas de la escultura disuadió a los restauradores de adherir los fragmentos en su lugar correspondiente tan pronto como este

era encontrado. Si eran unidos demasiado pronto, surgía el riesgo de bloquear a un fragmento adyacente que pudiese ser encontrado en el futuro y, a pesar de que el adhesivo empleado era reversible con disolventes, querían evitar cualquier reversión de uniones innecesarias.

En seguida comprobaron que, para una clara gestión de la totalidad de las piezas, se requeriría un método de registro y documentación hecho a medida. Cuando el rompecabezas de áreas particulares conseguía resolverse, a los fragmentos se les asignaban nuevos números consecutivos, conservando el número inicial de la cuadrícula en una base de datos.

Una vez una secuencia era localizada, se realizaban fotografías para documentar la ubicación de cada pequeño fragmento y así ayudar en la correcta colocación de los fragmentos a la hora de unirlos.

La comprensión de la naturaleza de las fuerzas que actuaban sobre los fragmentos más grandes de la escultura ya montada, fue centro de preocupación, ya que podría influir en la elección de los adhesivos, la necesidad y ubicación de espigas y el diseño de la armadura externa de tratamiento. Por ello, se realizó un estudio petrográfico y un examen superficial.

De este modo, la meticulosa reconstrucción de los fragmentos más pequeños duró doce años. En el transcurso de este tiempo, la investigación y los trabajos fueron intensos y complejos: escáneres 3D fueron empleados en la digitalización de los fragmentos más grandes con el fin de crear modelos virtuales que permitiesen un exhaustivo análisis estructural; por otro lado, gracias a este registro 3D de los numerosos e inmanejables fragmentos en que se había convertido la obra, fue posible (entre otras) ordenar y dar sentido a las piezas; se diseñaron e interpretaron las propiedades específicas de diferentes adhesivos y materiales con los que realizar las posibles espigas y se emplearon muestras de piedra diseñadas para imitar las uniones más críticas de la obra.



Fig. 184 Modelo Virtual de *Adam* realizado por Ronald Street y CAE Associates. Este fue empleado para el estudio de ingeniería para determinar las fuerzas y la posición en que deberían ser colocadas las espigas, así como su posición exacta y su tamaño y grosor. © Ronald Street & CAE Associates.

Empleando los modelos 3D, se plantearon y estudiaron numerosas posibilidades de tratamiento y de cada uno de los fragmentos (aquellos de mayor tamaño) se materializaron modelos físicos en espuma de poliuretano densa. Además, fue creado un modelo en resina epoxídica a escala 1:5, fácil de manejar y consultar durante el tratamiento de la obra real,

Fig. 185 A la izquierda puede verse el modelo a escala real del torso de *Adam* que está siendo fabricado en espuma de poliuretano densa por una máquina CNC que devasta la superficie. Este modelo se empleó para diseñar la armadura externa que se emplearía para sostener y manipular el original a la hora de restaurarlo y adherir los fragmentos; así como para formular y ensayar los métodos de montaje ©Ronald Street. A la derecha puede verse el modelo en suspensión sobre la pierna izquierda durante el desarrollo de la armadura. ©Carolyn Riccardelli, Michael Morris, George Wheeler, Jack Soultanian, Lawrence Becker & Ronald Street.

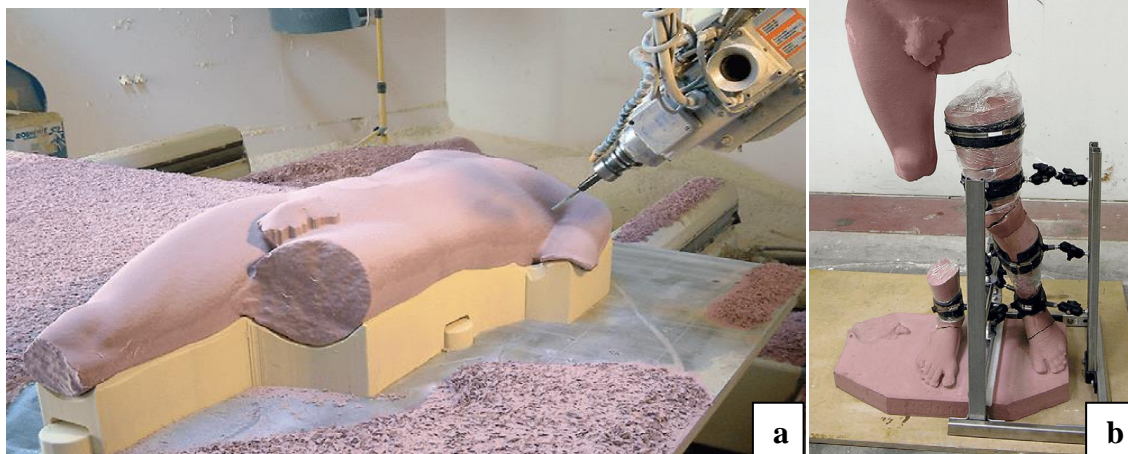
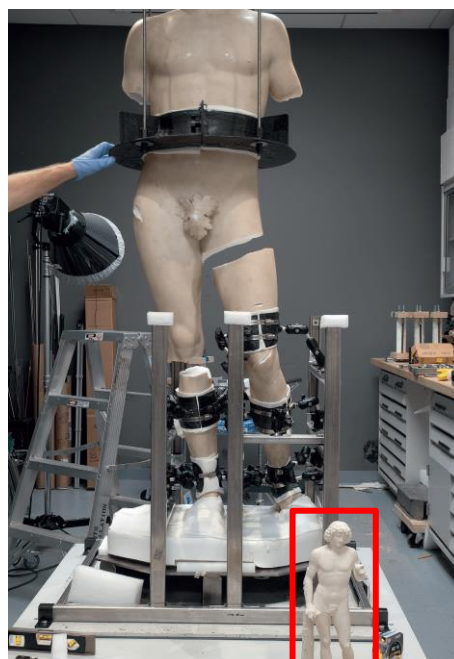


Fig. 186 *Adam* durante el proceso de restauración. La escultura fue colocada en su armadura de tratamiento por primera vez. El fragmento grande del torso podía ser maniobrado a la derecha o a la izquierda para proporcionar un mejor acceso al conjunto de la pierna. En rojo aparece destacado el modelo a pequeña escala realizado a partir del modelo virtual restaurado, y que fue materializado mediante una impresora 3D. ©Carolyn Riccardelli, Michael Morris, George Wheeler, Jack Soultanian, Lawrence Becker



Los trabajos descritos han sido realmente pioneros y han supuesto importantes avances en el campo de la conservación de escultura. Además de trabajar manipulando lo menos posible la pieza original, se reconstruyó virtualmente en 3D la obra para poder, tal y como ha podido apreciarse, ensayar con el prototipo. Por supuesto, tras los trabajos estructurales se llevaron a cabo las tareas de limpieza y reintegración de las faltas. Es fundamental destacar como, sin la ayuda del escáner 3D y la materialización de los modelos creados, esta intervención hubiese sido aún más larga y no hubiese sido posible la reubicación de tantos fragmentos. A partir del modelo reconstruido mediante anastilosis virtual, el resto de actuaciones fueron posibles. Actualmente la pieza se muestra en el Museo y puede ser visitada como parte de su colección permanente. Un vídeo y un panel informativo explican el proceso de restauración al que fue sometido, para que el público comprenda que lo que está viendo es gracias a los avances de la tecnología 3D.



Fig. 187 Adam tras la limpieza, con las reintegraciones completadas. ©Carolyn Riccardelli, Michael Morris, George Wheeler, Jack Soultanian, Lawrence Becker & Ronald Street.

5. 3. 2 Ejemplos de reintegración volumétrica y cromática empleando las técnicas 3D

Otro ejemplo que puede citarse es la restauración de la *Madonna de Pietranico*, terracota policromada del s. XV del Museo de L'Aquila, Italia. Esta estatua fue severamente dañada durante el terremoto ocurrido en el 2009 en el centro de Italia. Consecuentemente la obra se fragmentó en 19 piezas grandes y varios restos más pequeños (Scopigno, 2012, pp.12 y 113).

El proyecto fue desarrollado por un equipo de trabajo multidisciplinar, donde diferentes expertos de distintos campos aportaron sus conocimientos específicos y constituye un ejemplo más del empleo de las nuevas tecnologías y la cooperación entre diferentes profesionales. Se emplearon técnicas y materiales tradicionales en restauración apoyadas por avanzadas tecnologías 3D.



Fig. 188 Anastilosis virtual de la *Madonna de Pietranico* a partir de los fragmentos digitalizados y diseño de los dos elementos de soporte (cabeza y busto). © Roberto Scopigno.

El objetivo del proyecto de emplear modelos 3D no era simplemente documentar el proceso de intervención, sino que se buscaba que la tecnología 3D contribuyese activamente a la restauración con la definición y ensayo de hipótesis del reensamblaje virtual. La primera fase del proyecto consistió en la observación de los fragmentos para establecer las zonas de unión, un arduo trabajo especialmente en: aquellos fragmentos de menor tamaño, las piezas de la zona interna de la obra y los numerosos y pequeños fragmentos en los que la capa de policromía se había convertido tras el terremoto.

Entonces, se adhirieron los fragmentos que eran claros de posicionar, dejando de lado aquellos que eran más complicados dados su forma y peso. Lentamente, se fue

reconstruyendo la estructura original. La complejidad de las formas de los fragmentos hizo necesario apoyar los trabajos manuales con la restauración virtual. Para ello se digitalizó mediante escáner 3D cada uno de los trozos, excluyendo únicamente aquellos que eran realmente minúsculos. A lo largo del proceso, se constató que era necesario reconstruir de un modo virtual y previo los fragmentos para conseguir posicionarlos correctamente. Para realizar la anastilosis virtual, los restauradores combinaron pares de fragmentos coincidentes en la postura adyacente y los iban digitalizando de modo que, a la par que se trabajaba en el espacio virtual, se iban validando los pares propuestos físicamente, individualizando algunos para generar nuevas hipótesis de unión, hasta obtenerse finalmente las posiciones al completo de los pares coincidentes. Antes de adherir físicamente los trozos, los resultados de la anastilosis virtual fueron comparados con distintas fotos históricas de la obra, a fin de valorar la concordancia entre ambas. Una vez se acordó el esquema de la combinación, comenzó el proceso de intervenir la obra físicamente, apoyándose en los resultados obtenidos en el modelo virtual, que fue realmente útil.

Uno de los mayores retos que se presentó fue la dificultad de mantener unidos los fragmentos de la cabeza y del busto. No fue una tarea fácil, puesto que el sistema empleado para ello no podía ser visible y, sin embargo, debía ser capaz de soportar el peso de las piezas. La estructura de soporte final se basa en dos piezas sólidas que llenan el espacio vacío en el interior de la escultura, es decir en el pecho y la parte posterior de la cabeza, sirviendo de apoyo y acople a los fragmentos. Estas dos piezas están conectadas por una barra de hierro y se utilizan para sujetar y pegar todos los fragmentos. Fueron diseñadas con MeshLab a partir de los modelos 3D de los fragmentos reensamblados. Una vez obtenida la forma idónea, las dos piezas estructurales fueron impresas reconstruyendo la forma del espacio interno vacío delimitado por los fragmentos de la escultura. De este modo, se facilitó notablemente el montaje de los fragmentos al realizarse sobre este núcleo interno. Los fragmentos se fueron acoplando con los soportes creados, que encajaban y se adherían a las superficies perfectamente. Tras acoplar el busto y la cabeza, se completó la reconstrucción (Bevilacqua, 2011; Scopigno, 2011, p.22).

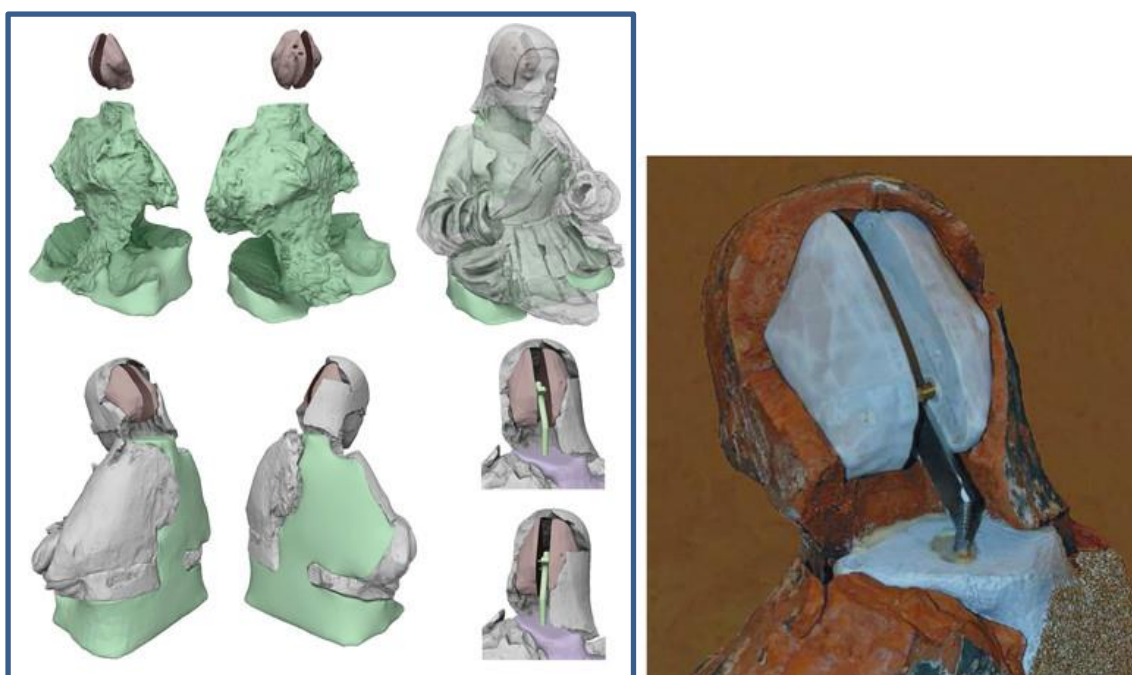


Fig. 189 Estructura que soporta la cabeza y el busto creada virtualmente (a la izquierda) y posteriormente prototipada para reensamblar el original (a la derecha). ©Roberto Scopigno, Paolo Cignoni, Nico Pietroni, Marco Callieri, Matteo Dellepiane.

Además, se emplearon programas de 3D para reintegrar volumétricamente las partes que se habían perdido y, puesto que la pieza presentaba pérdidas en la mayor parte de su policromía, se realizó una restauración cromática virtual de la misma (Bevilacqua, 2011 & Scopigno, 2012, pp.112 y 113).

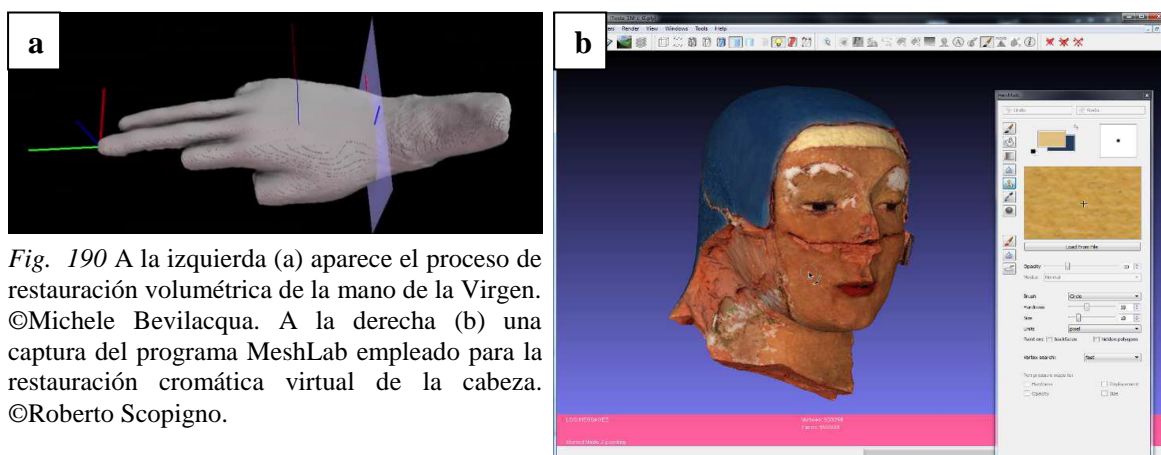


Fig. 190 A la izquierda (a) aparece el proceso de restauración volumétrica de la mano de la Virgen. ©Michele Bevilacqua. A la derecha (b) una captura del programa MeshLab empleado para la restauración cromática virtual de la cabeza. ©Roberto Scopigno.

En el 2011, con motivo del segundo aniversario del terremoto de L'Aquila, la obra fue presentada al público ya restaurada (Cocco, 2011).



Fig. 191 Pieza restaurada y lista para mostrar al público en el año 2011. ©Pietro Cocco.

Muy importante y conocido es el caso de *San Juan Bautista niño*, conocido como el “San Juanito”, de Miguel Ángel. La única escultura de Miguel Ángel que se conserva en España, realizada en mármol, fue quemada y desmembrada en fragmentos incompletos a comienzos de la Guerra Civil Española. En el 2015 en el Centro de Restauración de Florencia, la Fundación Casa Ducal de Medinaceli-Sevilla, propietaria de la pieza, se encargó de que el proceso de restauración se realizase en Florencia en el Opificio delle Pietre Dure y este se inició en 1994. Tras la delicada y compleja intervención, realizada con la última tecnología de reconstrucción volumétrica 3D, y después de su exhibición en Florencia y Venecia, *San Juan Bautista niño* regresó a España para exponerse en el Museo del Prado desde el 31 de marzo al 28 de junio de 2015 como parte de su programa expositivo *La obra invitada*, antes de su traslado a su lugar de origen en Úbeda (Museo del Prado, 2015).

Reconstituir la obra no fue tarea sencilla. El 60% de la escultura de 140 cm se había perdido. De los 17 fragmentos que se enviaron a Florencia para su restauración, tres resultaron no pertenecer a la obra. Para entender el estado de conservación en el que algunas de las piezas se conservaban, basta con decir que la cabeza de *San Juanito* fue lanzada a una hoguera. Cuando en 1995 llegaron los fragmentos el equipo de conservación realizó numerosos análisis y estudios, pero no fue hasta 2011 cuando dispusieron de las ventajas tecnológicas que permitieran la exitosa intervención.

El primer paso consistió en el escaneado de cada pieza para reconstruir la obra mediante anastilosis virtual y poder visualizar así los volúmenes perdidos. Solo entonces el equipo fue consciente de todas las pérdidas que la obra tenía, y pudo realizarse el modelado en 3D de las mismas, que fueron posteriormente reproducidas con nylon y fibra de vidrio. Los fragmentos fueron montados mediante pernos de acero inoxidable encajados entre las piernas y el tronco del árbol en el que se apoya *San Juanito*, puesto que el material original era muy pesado, lo que provocaba problemas de estabilidad. Además, surgieron complicaciones, como el montaje de la cabeza y los brazos, hasta que se optó por encajar las piezas con un sistema de imanes que concluyó el proceso muy satisfactoriamente.



Fig. 192 Fotografía que documenta el estado en el que la obra quedó cuando un bombardeo destruyó el 26 de julio de 1936 la Sacra *Capilla de El Salvador*, en Úbeda. ©Fundación Medinaceli.



Fig. 193 Fragmento de la cabeza de *San Juanito* en el que las huellas del fuego aún se apreciaban. ©Fundación Medinaceli.

Las uniones entre piezas recibieron una pátina para homogenizar el conjunto y con láser se limpiaron los fragmentos carbonizados. Se espera que en un futuro puedan recuperarse otros fragmentos, por lo que más que nunca la reversibilidad de los materiales y su ubicación es fundamental en la metodología desarrollada para la problemática que presentaba la obra (Cuéllar J., 2015; Rtve, 2015).

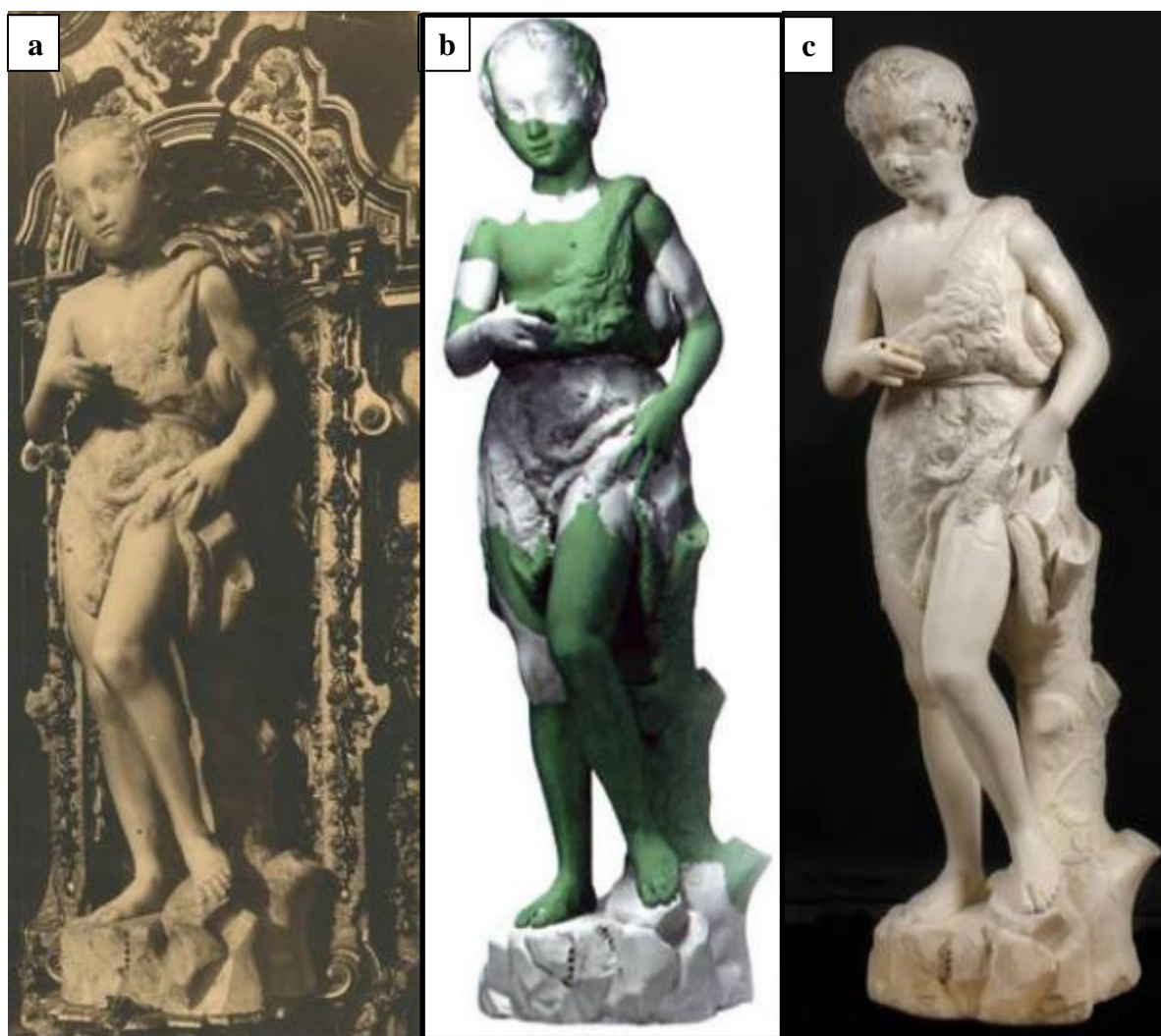


Fig. 194 En la secuencia de imágenes aparece el *San Juanito*. A la izquierda, en una foto antigua, ubicado en la Capilla de Úbeda (a); en el medio la imagen muestra el modelo 3D en el que las zonas verdes indican los añadidos necesarios para completar la obra (b); a la derecha la obra tal y como se muestra hoy tras la intervención (c). Puede verse claramente como las piezas añadidas tienen un acabado diferente al original, para que se entienda que son añadidos necesarios para la correcta lectura de la obra. ©Fundación Medinaceli.

5. 4 Ejemplos de restauraciones virtuales no materializadas. Opciones de representación

Dados los diferentes ejemplos que a continuación se citan referentes a intervenciones sobre patrimonio, muy especialmente arqueológico y arquitectónico, es posible afirmar que existen numerosos casos en los que las restauraciones finalmente no se llevan a cabo. Los motivos pueden ser muy variados, entre los que destacan la falta de presupuesto o inversores, irregularidades en licencias o leyes que prohíban su intervención, falta de consenso entre especialistas, inviabilidad de la intervención por falta de medios o bien el hecho de que las técnicas de intervención conocidas en el momento de la intervención no supongan la puesta en práctica de una buena *praxis* sobre el bien, por lo que se decida dejar como está para intervenirlo en un futuro, a la espera de nuevas técnicas y tratamientos.

Este último motivo queda perfectamente ejemplificado con un caso ocurrido en España durante el verano de 2013, cuando fue hallado un conjunto de fragmentos escultóricos recuperados en el foro de la ciudad romana de *Los Bañales* en Uncastillo, Zaragoza (Romero, Andreu y Galbadón, 2014, p.197).



Fig. 195 Fragmento de la coraza del *thoracatus* de *Los Bañales*. A la derecha puede verse el detalle del motivo central. ©Paleorama.

Además de la importancia que para la arqueología hispano romana supuso el hallazgo de estos fragmentos (casi 40), se confirmó que ciudades aparentemente pequeñas del interior peninsular estaban perfectamente abiertas a los programas oficiales decorativos, en este caso las esculturas, que llegaban directamente desde Roma. Este hecho destacó la capacidad con la que la administración romana potenciaba a sus centros, uno de ellos la ciudad de *Los Bañales*, para convertirlas en imágenes en miniatura de Roma y reflejo de su poder. Entre los fragmentos hallados, cerca de medio centenar, destacaron rápidamente un total de siete, algunos encajables entre sí, que formaban parte de una estatua imperial acorazada: un *thoracatus*. De ella se conservaron las piernas casi completas hasta la cintura y sobre todo la parte inferior de la coraza profusamente decorada, por lo que se pudo constatar que formaban parte de una estatua acorazada de un emperador. El motivo tallado en la coraza facilitó a los investigadores la realización de una propuesta de datación de la misma y, dadas las incisiones que en ella aparecen, se propuso que la escultura representaba el emperador Domiciano tras la victoria sobre los Catos. La coraza fue esculpida en la mejor y más noble variedad del mármol italiano de carrara (Videos los Bañales, 2014).

La elección del nombre del proyecto *Princeps Resurgens* no fue ocasional, puesto que plasma las intenciones del equipo de recuperar el conjunto de fragmentos escultóricos y, sobre todo, la grandeza y esplendor que la figura debió mostrar en la ciudad a su paso por el foro de Los Bañales (Maqueda, Luque, Andreu y Romero, 2015, p.71).

Gracias a la colaboración de la UNED de Tudela y a la empresa Paleorama, fueron documentados los fragmentos mediante fotogrametría (Videos los Bañales, 2014), para crear un modelo preciso científico de alta calidad, de modo que sirviera para realizar investigaciones; y otro con un menor número de polígonos para que pudiera ser visualizado online.



Fig. 196 Relación de fragmentos recuperados de la estatua imperial de Los Bañales. ©Paleorama / Los Bañales.

Más allá de la fragmentación que presentan, el estado de conservación de las piezas es realmente bueno, de modo que fue posible una perfecta toma y gestión de datos para la generación del modelo. El ejercicio de toma de datos fotogramétrico fue realizado únicamente en dos sesiones, en la primera se fotografiaron los fragmentos y en la segunda se rectificaron los errores de la primera toma de datos y amplió la documentación fotográfica.

De cada pieza se realizó un modelo con cargas poligonales de más de 2 millones de polígonos, que se definió como *Modelo Máster*, puesto que sirvió como elemento fundamental y básico de referencia para realizar las diferentes versiones en la fase de exportación a los formatos de trabajo finales. Una vez obtenidos todos los modelos de cada uno de los fragmentos, se procedió a la reintegración virtual total de los restos (Maqueda et al., 2015, pp.68 y 69).

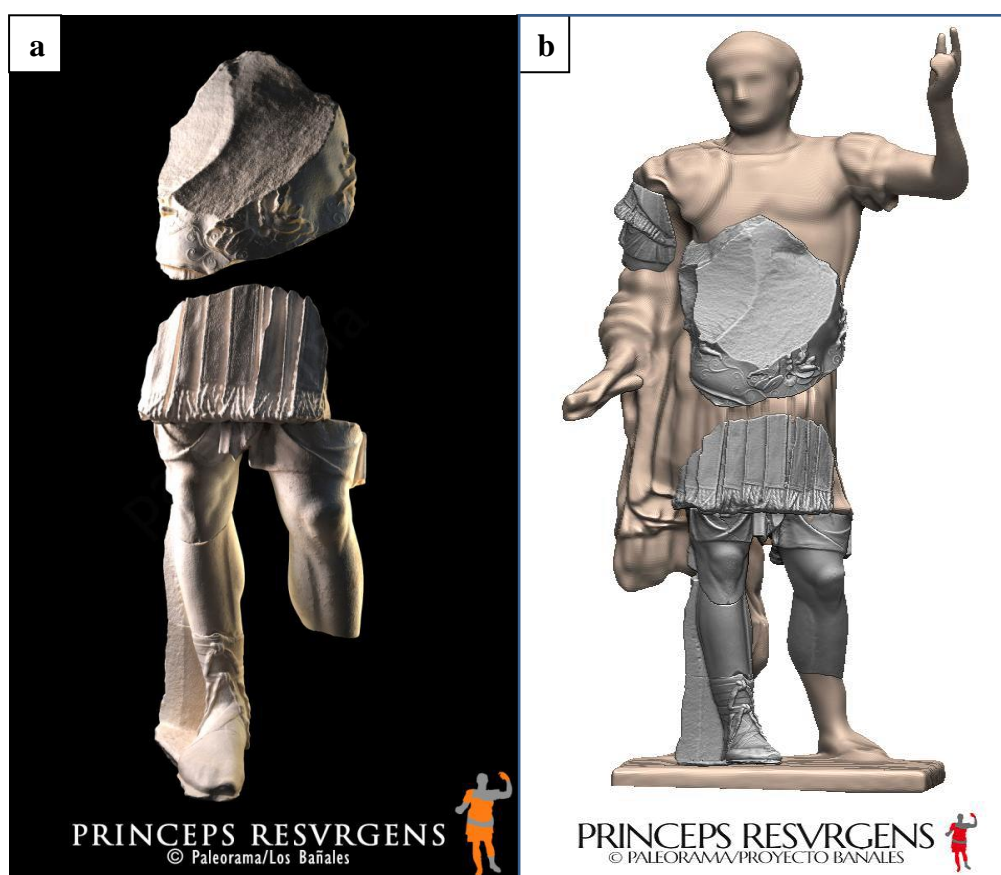


Fig. 197 A la izquierda (a) aparece el resultado de la integración de los restos principales del conjunto de piezas. ©Paleorama / Los Bañales. A la derecha (b) puede verse la integración de los fragmentos dentro de la hipótesis formal total. ©Paleorama / Proyecto Bañales.

Aún debe integrarse una serie de piezas que se encuentran documentadas, pero que por tratarse de piezas que no están conexas entre sí, exigen cautela a la hora de situarlas en la reconstrucción, evitando realizar hipótesis poco cimentadas o incluso falsas.

El modelo virtual permite conocer qué aspecto tendría la estatua, pero, sobre todo, mantiene el original intacto. Al no unir los fragmentos se favorece su conservación puesto que dando por seguro que aparecerán más fragmentos en próximas campañas, se está evitando la repetida manipulación de los mismos, respetando al máximo el original.

Otro proyecto que debe destacarse es la anastilosis virtual de una escultura arcaica griega de la antigua Sicilia. Este proyecto ha sido realizado empleando dos piezas que se encuentran en dos museos diferentes, de modo que su significado y valor no eran completamente comprendidos por el público. Por ello, se propuso la realización de un ejercicio de anastilosis virtual de estas dos partes, consistentes en una cabeza y torso de mármol.

Puesto que su asociación ha sido desde el primer momento objeto de debate entre investigadores, el ensamblaje de las dos partes no ha llegado si quiera a intentarse.

El primer estudioso que sugirió una posible asociación entre la cabeza y el torso fue Guido Libertini en los años 30. Este realizó un vaciado en yeso de la cabeza con el fin de compararlo con el torso para verificar su hipótesis. Aunque una parte del cuello no permitía una combinación perfecta, la correspondencia

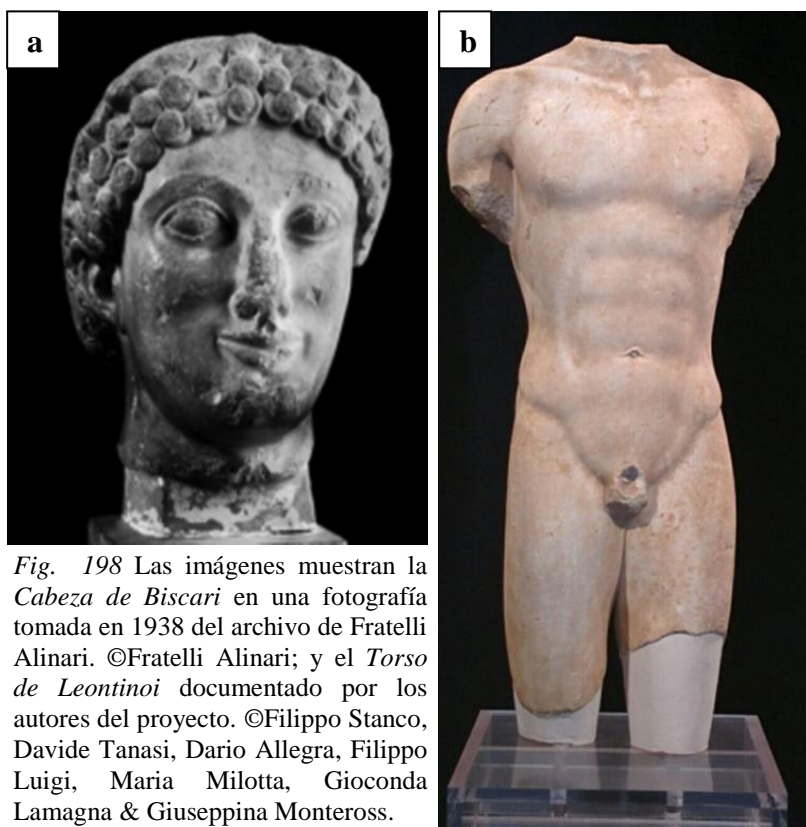


Fig. 198 Las imágenes muestran la *Cabeza de Biscari* en una fotografía tomada en 1938 del archivo de Fratelli Alinari. ©Fratelli Alinari; y el *Torso de Leontinoi* documentado por los autores del proyecto. ©Filippo Stanco, Davide Tanasi, Dario Allegra, Filippo Luigi, Maria Milotta, Gioconda Lamagna & Giuseppina Monteross.

volumétrica junto con las analogías estilísticas fue suficiente para apoyar la idea de que las dos piezas pertenecían a la misma escultura. Décadas después, Gino Vinicio Gentili reevaluó el problema de la asociación de las dos piezas confirmando la hipótesis y publicó el estudio en un artículo científico.

Con el fin de completar estos estudios y proporcionar la prueba definitiva de la compatibilidad de las dos piezas, se planteó la realización de un estudio en el que se realizaría una anastilosis virtual mediante el escáner 3D. Para el escaneado se empleó el Structure Sensor acoplado en un iPad y el proceso se realizó con extremo cuidado, con el fin de capturar adecuadamente los muchos detalles anatómicos de las dos piezas. Tras la captura de los datos, los modelos tridimensionales fueron postprocesados con Meshlab y Blender. El primer programa fue empleado para refinar los modelos y eliminar los vértices ajenos a los artefactos y un poco de ruido residual. También los pedestales que soportaban las piezas fueron recortados y se tomaron medidas digitales de la cabeza y el cuello para verificar la compatibilidad dimensional. Tras tomar numerosas medidas de las piezas, y sobretodo, al compararse la altura de la cabeza con la del torso, se evidencia que son proporcionales entre sí.

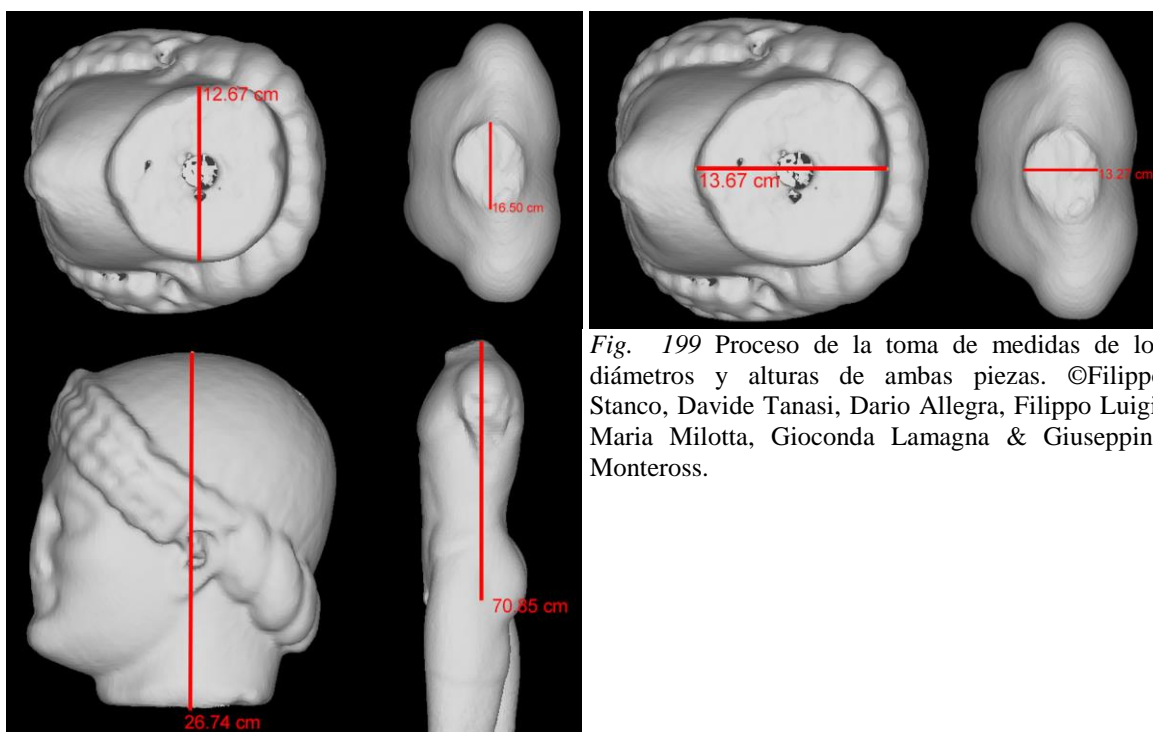


Fig. 199 Proceso de la toma de medidas de los diámetros y alturas de ambas piezas. ©Filippo Stanco, Davide Tanasi, Dario Allegra, Filippo Luigi, Maria Milotta, Gioconda Lamagna & Giuseppina Monteross.

Posteriormente, los modelos fueron importados a Blender, donde fueron alineados manualmente. Los análisis técnicos y arqueológicos han demostrado que la estatua perdió parte del cuello.



Fig. 200 Alineamiento manual en Blender® de ambas partes. Puede verse la pérdida de materia en el cuello. ©Filippo Stanco, Davide Tanasi, Dario Allegra, Filippo Luigi, Maria Milotta, Gioconda Lamagna & Giuseppina Monteross.

La investigación presentada en este trabajo ha demostrado claramente que la hipótesis sugerida en primer lugar por Libertini era correcta, puesto que las dos piezas son sin duda parte de la misma obra, ya que no sólo comparten las mismas características estilísticas, sino que también son compatibles en términos de geometría. Esta anastilosis virtual ha añadido información adicional al concluirse que la estatua parece muy proporcionada y la cabeza, incluso en ausencia de una unión perfecta debido a la falta del segmento del cuello, se adapta perfectamente al cuerpo. Los resultados obtenidos permitieron, además, la creación de una plataforma web para el acceso del modelo al público y, con el fin de incluir una mayor accesibilidad para el público con discapacidades físicas o cognitivas, la realización también de una impresión tridimensional de la estatua restaurada y la creación de una experiencia de aprendizaje por medio de dispositivos hápticos⁴⁷ (Stanco et al., 2017).

A pesar de existir un gran número de esculturas clásicas fragmentadas, puede afirmarse que los fragmentos de cerámica son los hallazgos más frecuentes en una excavación y estos son esenciales para la reconstrucción del pasado, puesto que proporcionan información acerca de todos los aspectos de la vida del hombre (Tsiafaki et al., 2016, p.67). Es recientemente cuando están surgiendo propuestas de restauración

⁴⁷ Este tema será desarrollado en el capítulo 7.

virtual de estas piezas arqueológicas. Hace unos años, el método consistía únicamente en el empleo de aplicaciones de diseño tridimensional, las cuales, introduciendo las medidas reales del objeto, realizaban un modelo 3D de la pieza empleando una herramienta de diseño tipo torno, es decir, revolucionando la sección hasta obtener el volumen completo de 360°. Las texturas que se aplicaban se generaban matemáticamente, intentando conseguir en todo momento acabados similares a los originales. Posteriormente, se introdujeron texturas reales, en forma de archivos de imagen tomados de la pieza original, con el fin de obtener, mediante su modificación y mapeado, texturas originales y acabados más fieles a la realidad. Sin embargo, el mayor avance surge con la aplicación de los instrumentos y técnicas de documentación avanzada, como el escáner 3D o la fotogrametría digital, a los procesos de restauración virtual (Tejerina, Esclapés, Pasies y Melchor, 2011, p.242).

Como ejemplo de piezas arqueológicas restauradas virtualmente, se establece un cántaro (recipiente para bebidas) del periodo arcaico (VII-VI a.C.), descubierto fragmentado en las excavaciones del asentamiento de *Karabournaki*, en la zona de Tesalónica, en Grecia. Este caso es fundamental para estudiar la historia del lugar y por su gran importancia arqueológica debido a sus peculiaridades en cuanto a la forma, la decoración y su funcionalidad.

Estudiando los fragmentos, los arqueólogos reconocieron la forma del cántaro y consiguieron montar los fragmentos en sus posiciones correctas mediante anastilosis. Sin embargo, faltaban partes fundamentales para la estabilidad de la pieza como la inferior con su base por lo que el equipo se planteó emplear las tecnologías 3D para realizar una reconstrucción virtual del vaso, con el fin de solventar las limitaciones que los estudios tradicionales de la cerámica acarrearán. El caso podría ayudar a avanzar en el estudio arqueológico, manejo y documentación de los cántaros.

El empleo de la anastilosis virtual permitiría, además, estudiar diferentes hipótesis de reconstrucción de los fragmentos para elegir la mejor versión del cántaro original; ayudar al estudio arqueológico del vaso y a una mejor comprensión de su forma inicial, por lo que se llegaría a una mejor interpretación de su funcionalidad. Por otra parte, el modelo 3D reconstruido contribuiría a las necesidades de divulgación, puesto que los estudiantes y el público en general comprenderían mejor el significado del mismo. La digitalización de las piezas se hizo con fotogrametría empleando, para la toma de datos, un plato giratorio de

alta precisión controlado por ordenador y un par de cámaras réflex Samsung. Para la automatización de las fotos de cada una de las piezas, implementaron una herramienta de software capaz de controlar el plato giratorio mientras las cámaras tomaban las fotografías. Fue necesario el empleo de una serie de soportes para asegurar la estabilidad de las piezas en el plato giratorio. A pesar de la automatización, la captura de todas las concavidades resultó un proceso complejo. Un total de 2851 imágenes se utilizaron para la reconstrucción 3D de los nueve conjuntos de piezas diferentes que se habían obtenido a partir de la unión de algunos de los fragmentos mediante anastilosis tradicional. Antes de adherir estas piezas, cada una de ella fue escaneada individualmente.

El primer paso una vez las piezas se encontraban correctamente digitalizadas fue la detección del eje de simetría del vaso basándose en el análisis de la forma de las piezas, especialmente aquellas más grandes. El programa Blender fue empleado para encontrar las intersecciones del plano con la malla 3D, con el fin de extraer conjuntos de puntos tanto verticales como horizontales, es decir, perfiles situados en un plano en el espacio 3D. Las intersecciones fueron realizadas en las áreas menos dañadas por la erosión, en un intento de extraer las mejores mediciones posibles.



Fig. 201 Modelos 3D de los nueve conjuntos de piezas organizados en dos grupos en función de su contigüidad. ©Despoina Tsiafaki, Anestis Koutsoudis, Fotis Arnaoutoglou & Natasa Michailidou.

Para colocar los fragmentos correctamente en el escenario 3D, es requisito previo la obtención del eje de simetría del objeto, por lo que los conjuntos de puntos extraídos se procesaron en Matlab empleando ecuaciones circulares que identificasen los límites interiores y exteriores del cuerpo principal del vaso y obtener así el eje de simetría. Sin embargo, un vaso hecho a mano no es simétricamente perfecto y los fragmentos suelen sufrir deformaciones con el paso de los años, siendo difícil establecer el eje de simetría exacto, aunque si se consiguió el "óptimo" para el trabajo.

Una vez se identificó el eje de simetría, los fragmentos fueron alineados manualmente tomando como base la información proporcionada por los arqueólogos y empleando los límites internos y externos previamente definidos. En el grupo 1 de fragmentos, el asa está completa mientras que en el segundo grupo se puede ver sólo una parte donde el asa comenzaría. Los dos grupos se posicionaron uno contra el otro utilizando el asa como un fuerte indicador de simetría, mientras que todos los fragmentos se colocaron dentro de los límites interior y exterior. Todo el proceso de alineación fue realizado manualmente con Blender.

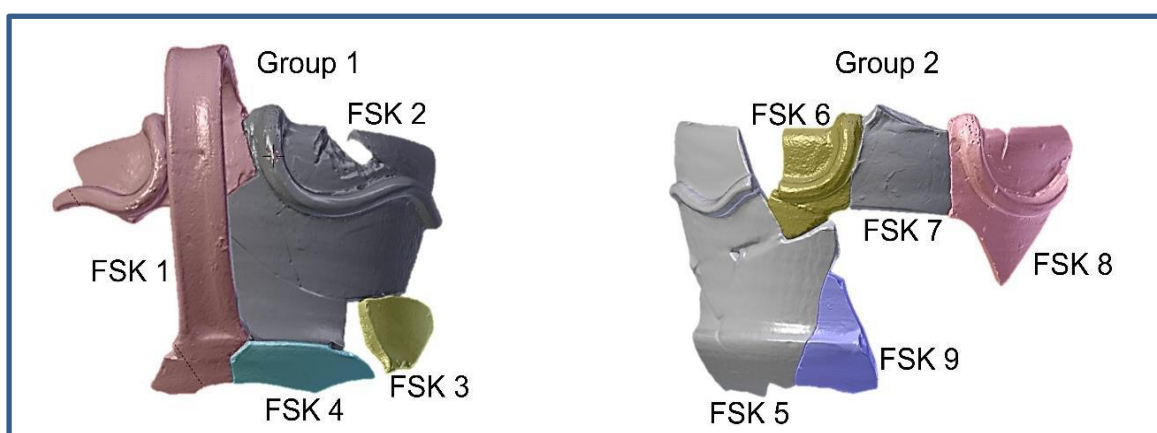


Fig. 202 Distribución espacial de las piezas: a la izquierda el grupo 1 y a la derecha, el 2. ©Despoina Tsiafaki, Anestis Koutsoudis, Fotis Arnaoutoglou & Natasa Michailidou.

Una vez se creó el resto del cuerpo sintético, generado mediante ordenador empleando la técnica de modelado en 3D con torno, se realizaron varias operaciones de Booleanas, es decir, intersecciones de la malla 3D entre el cuerpo sintético y los fragmentos del vaso, para que las áreas solapadas, de la malla y la reintegración volumétrica, se eliminaran con precisión. De este modo, se consiguió una visualización de las piezas faltantes del cuerpo del vaso. Además, se produjo un duplicado del asa conservada y se empleó para completar virtualmente el objeto. Como el perfil de la base del vaso estaba ausente, puesto que no existían restos de la parte inferior, esta se modeló virtualmente realizando diferentes versiones, todas ellas siguiendo los principios de diseño de este tipo de vaso hasta que el equipo de arqueólogos decidió cual se ajustaba más al posible estado inicial de la base.

El último paso del proceso consistió en realizar el mapeo de la textura de las partes sintéticas del vaso. Para ello, se seleccionó un material de arcilla, ya que ofrecía una visualización realista y líneas visuales limpias entre las partes digitalizadas y las modeladas

virtualmente. El asa duplicada también fue texturizada empleando el material de arcilla y no los colores originales preservados para las piezas originales.



Fig. 203 Visualización de la parte sintética del cuerpo del recipiente. A la izquierda el alineamiento con los conjuntos de piezas y a la derecha el resultado tras la aplicación de las operaciones de booleanas en la malla. ©Despoina Tsiafaki, Anestis Koutsoudis, Fotis Arnaoutoglou & Natasa Michailidou.



Fig. 204 Renderizado de dos puntos de vista diferentes del cántaro completamente restaurado virtualmente. ©Despoina Tsiafaki, Anestis Koutsoudis, Fotis Arnaoutoglou & Natasa Michailidou.

Tras la finalización de la digitalización 3D y la reconstrucción, se llevó a cabo una evaluación, con el fin de examinar los resultados obtenidos. Para ello, se contó con la colaboración del COSCH, Colour and Space in Cultural Heritage⁴⁸, cuyos miembros, principalmente arqueólogos, museólogos y expertos en tecnología, examinaron el modelo

⁴⁸ El principal objetivo del COSCH es promover la investigación, el desarrollo y la aplicación de técnicas de medición óptica, adaptadas a las necesidades de la documentación patrimonial, basadas en una cooperación interdisciplinaria, en un nivel europeo concertado y ofrecer una nueva y fiable base de conocimientos, independiente y global, que facilite el uso de las técnicas ópticas actuales y futuras de medición para apoyar la documentación del patrimonio europeo. El COSCH contribuye a mejorar la comprensión del material y ayuda a su preservación a largo plazo (Cosch, s.f.).

3D. La evaluación aportó ideas muy interesantes sobre el modelo 3D y su uso para fines arqueológicos y museológicos, tanto para investigadores como para el público en general y consideraron que el modelo 3D conlleva una gran mejora en el sistema tradicional de documentación arqueológica gráfica, proporcionando una alta calidad de imagen y una réplica digital del vaso en dimensiones reales. También señalaron que el modelo contribuye fuertemente a la salvaguarda digital de las características materiales del objeto. Además, es especialmente útil para el objeto original, que podría ser restaurado empleando como soporte de los fragmentos originales la base impresa del modelo 3D obtenido.

Desde un punto de vista arqueológico, este modelo 3D facilita el estudio de los especialistas puesto que puede ser apreciado desde todos sus lados y tan cerca como fuera necesario, sin siquiera tocar el original y desde cualquier parte del mundo. Esta restauración consigue que el espectador e incluso un investigador, tengan una idea precisa sobre cómo era el recipiente, más que si tuviese que ver imágenes de los fragmentos individuales o los propios fragmentos sueltos.

Como suele ocurrir con otros proyectos, un modelo de más baja calidad podrá verse en la web, y resultará fácil de descargar y manejable en cualquier PC; mientras que otro de calidad superior será reservado para investigadores y labores museológicas, como por ejemplo a fin de compararlo con el estado de conservación futuro del vaso y, por tanto, para tomar decisiones en términos de su conservación. Este modelo podría ser expuesto al lado de los fragmentos reales para ayudar al público a obtener una imagen completa del vaso y entenderlo mejor (Tsiafaki et al., 2016).

Otro ejemplo que puede ejemplificar este tipo de reconstrucciones virtuales es el referido a una pieza procedente de los fondos del Museo Arqueológico Comarcal de la Plana Baixa de Burriana (Castellón). Se trata de una jarrita islámica que presenta decoración polícroma realizada con la técnica denominada “cuerda seca⁴⁹”. La primera fase del trabajo se centró en la obtención de un modelo tridimensional completo, para la cual se empleó el escáner 3D Next Engine. El modelo fue posteriormente restaurado virtualmente en Blender, trabajando con curvas Bézier, superficies paramétricas que

⁴⁹ La técnica de la cuerda seca designa aquella decoración de cerámica en la que los esmaltes están aislados por líneas pintadas con una mezcla de materia grasa y óxido de manganeso. Durante la cocción, esta materia se quema, dejando sólo una traza negra (Cerámica Tres Piedras, s.f.).

cuentan puntos de anclaje y puntos de control a partir de los cuales y mediante su manipulación, es posible modificar el desarrollo de la curva.

De este modo, una vez el modelo 3D fue correctamente posicionado, se creó una curva Bézier y, a continuación, un círculo Bézier. Este debe tener siempre el mismo diámetro que la base de la pieza importada y estar asociado a la curva Bézier. A partir de ese momento, se manipularon los nodos de la curva bézier para adaptarlos y que encajasen con la forma de la pieza original. La curva Bézier, modificada y adaptada a la forma de la jarrita islámica, proporcionó la sección de la misma a partir de la cual pudo obtenerse el volumen completo de la pieza puesto que este tipo de objetos se fabricaban en un torno de alfarero, lo que proporciona formas con un alto grado de simetría y la volumetría suele ser homogénea y regular de modo que revolucionando la sección obtenida se completó el modelo.

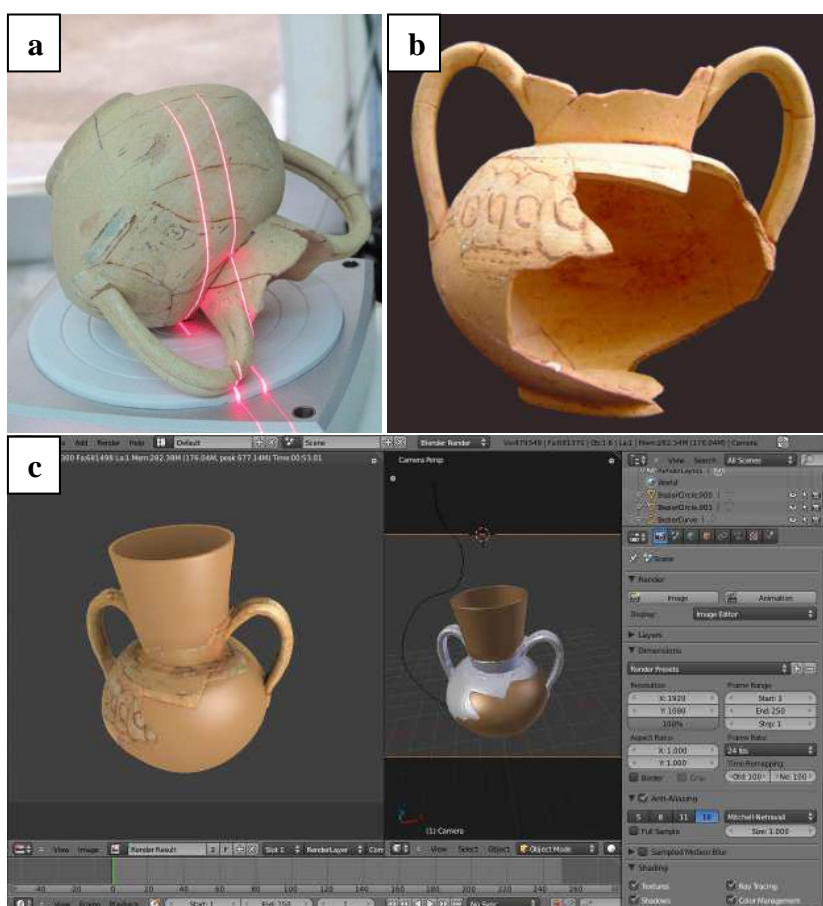


Fig. 205 a) Proceso de documentación de la pieza; b) modelo 3D de la pieza una vez ha sido digitalizada; c) integración del modelo 3D procedente del escáner y reconstrucción volumétrica. ©Daniel Tejerina Antón, Fco. Javier Esclapés Jover, Trinidad Pasíes Oviedo, José Manuel Melchor Montserrat.

Una vez completado el modelo geométrico, se procedió a la reintegración cromática. Las decoraciones en este tipo de piezas son muy variadas y, al estar realizada a mano, es realmente muy irregular. Además, la gama de intensidades cromáticas es muy variada y de muy diferente intensidad por el estado de conservación de los pigmentos y su heterogénea aplicación. Por ello, finalmente se optó por integrar la nueva geometría de la pieza empleando para el material reintegrado un tono e intensidad uniformes extraídos del color original de la pasta de la pieza. Así, se facilita al visitante la lectura correcta del volumen del objeto, apreciando los motivos decorativos originales. (Tejerina et al., 2011).



Fig. 206 Modelo 3D tras su restauración digital. ©Daniel Tejerina Antón, Fco. Javier Esclapés Jover, Trinidad Pasíes Oviedo, José Manuel Melchor

Las reconstrucciones virtuales, como se ha indicado, contribuyen, no sólo a la conservación y estudio del patrimonio, como se ha indicado, sino también a su difusión. Con motivo del Centenario de la declaración del yacimiento romano *Itálica de Santiponce*, como Monumento Nacional en 2012, se anunció la puesta en marcha de un plan con el que darle un plus de divulgación y puesta en valor. Así, tras un trabajo arqueológico de más de doscientos años, la prioridad de la ciudad romana de *Itálica* es mantener, conservar, proteger y difundir todo su patrimonio. La restauración de las obras es también una de las labores fundamentales, muy especialmente en el caso de los mosaicos, que se mantienen *in situ*. *Itálica* es un yacimiento visitado al año por más de 170.000 personas, ocupando el tercer lugar de Andalucía, si se tiene en cuenta la afluencia de público. La ciudad mantiene sus caminos y estructuras tal y como eran en la época de Adriano y es posible pasear por ellas.

El desarrollo del conjunto urbano se basó en la hipótesis virtual creada y el proceso de levantamiento tridimensional del caserío fue lento y laborioso puesto que se debían de desarrollar 66 manzanas de edificaciones en la ciudad antigua y 44 manzanas de

edificaciones en la ampliación adrianea, además de la muralla y las villas rurales del contexto territorial cercano a la ciudad.



Fig. 207 Reconstrucción virtual de la ciudad de Itálica en el siglo II. © Alfredo Grande y José Manuel Rodríguez Hidalgo.

Por su parte, los pavimentos romanos, normalmente cubiertos de mosaicos, se restauraron virtualmente empleando ortofotos de gran resolución. Puesto que pocos restos de pintura mural se conservan, hubo que interpretar motivos decorativos del mundo romano paralelo de otras localizaciones⁵⁰.

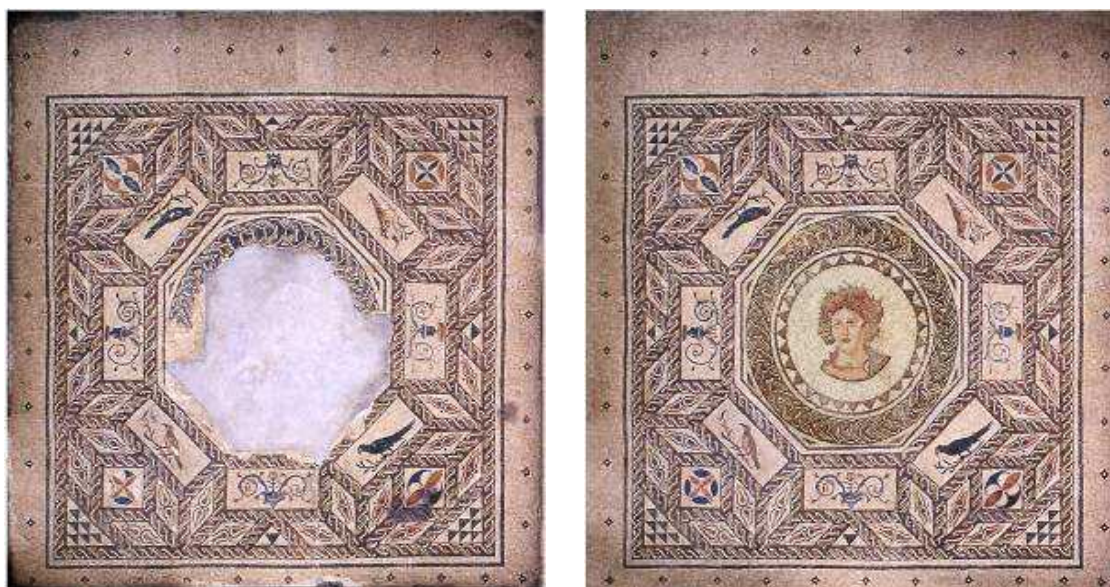


Fig. 208 A la izquierda la imagen del estado actual del *Mosaico de Tellus* de la *Casa de los Pájaros* de Itálica, donde se aprecia claramente la laguna central donde el emblema fue robado en la década de los ochenta. A su derecha, la restauración digital del mismo. © Alfredo Grande y José Manuel Rodríguez Hidalgo.

⁵⁰ Se seleccionaron composiciones de pintura mural y artesonados y yeserías de los siguientes yacimientos arqueológicos: Domus Aurea, Casa de los Grifos del Palatino, Casa de la Farnesina, Casa de Livia del Palatino, de Roma; Casa della Caccia Antica, Villa de los Misterios, Casa de Apollina, Casa de Lucretius, Termas Stabianas, Casa de los Vettii, de Pompeya; Casa Sannitica de Herculano; Villa de Poppea de Torre Anunciatta; Villa de Boscoreale, en Boscoreale y la Villa de Stabia, Stabia. Italia.

Con ellas, se desarrollaron las intensas labores de restauración virtual a partir de documentación fotográfica. En algunos casos se cerraron dibujos faltantes por simetría o analogía, dejando lagunas neutras poco perceptivas en aquellas zonas imposibles de interpretar correctamente.

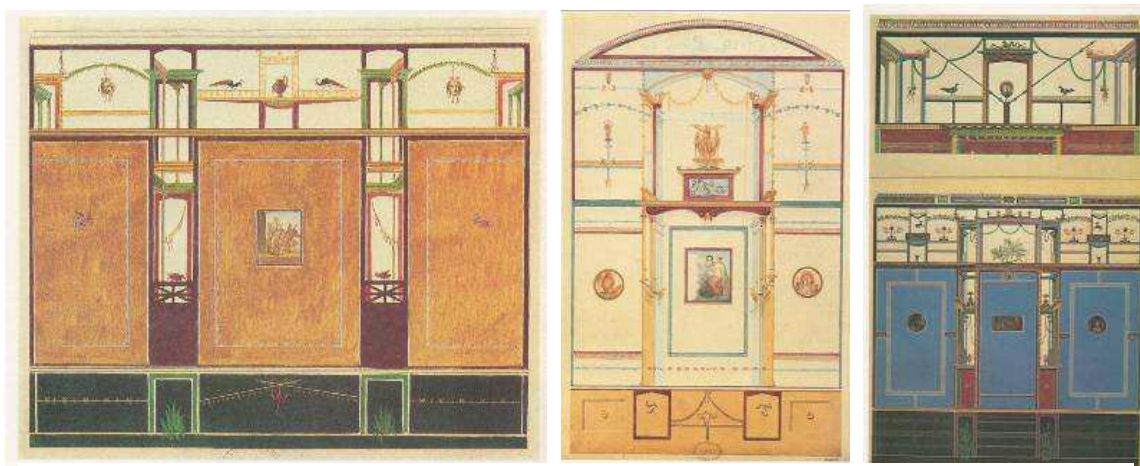


Fig. 209 Ejemplos de modelos de pintura mural histórica restaurados virtualmente. © Alfredo Grande y José Manuel Rodríguez Hidalgo.

Los elementos de todo el mobiliario de las edificaciones también fueron desarrollados virtualmente a partir de los expuestos en el Museo Arqueológico de Nápoles, poseedor de la colección más importante de ajuar romano del mundo; se construyeron los distintos platós virtuales y se procedió a su iluminación fotorrealista de las estancias interiores y exteriores, analizando la luz de Sevilla en las distintas horas del día, mañana, mediodía, tarde y noche. Por último, se crearon los habitantes, empleando una escrupulosa selección de cuadros de finales del siglo XIX, neoclásicos e historicistas europeos, que retratan en sus obras el esplendor y ocaso de grandes civilizaciones con la egipcia, babilónica, griega, romana, etc. La calidad de las mismas y su hiperrealismo las hacían muy oportunas para representar la vida y costumbres de los patricios romanos de la ampliación de Adriano. Puede sorprender que los humanos no fuesen generados también de un modo virtual, puesto que existen técnicas muy avanzadas para realizar secuencias; sin embargo, se consideró que la verdadera protagonista era la ciudad y su restauración virtual, quedándose en un intencionado segundo plano la “humanización” de las estancias.

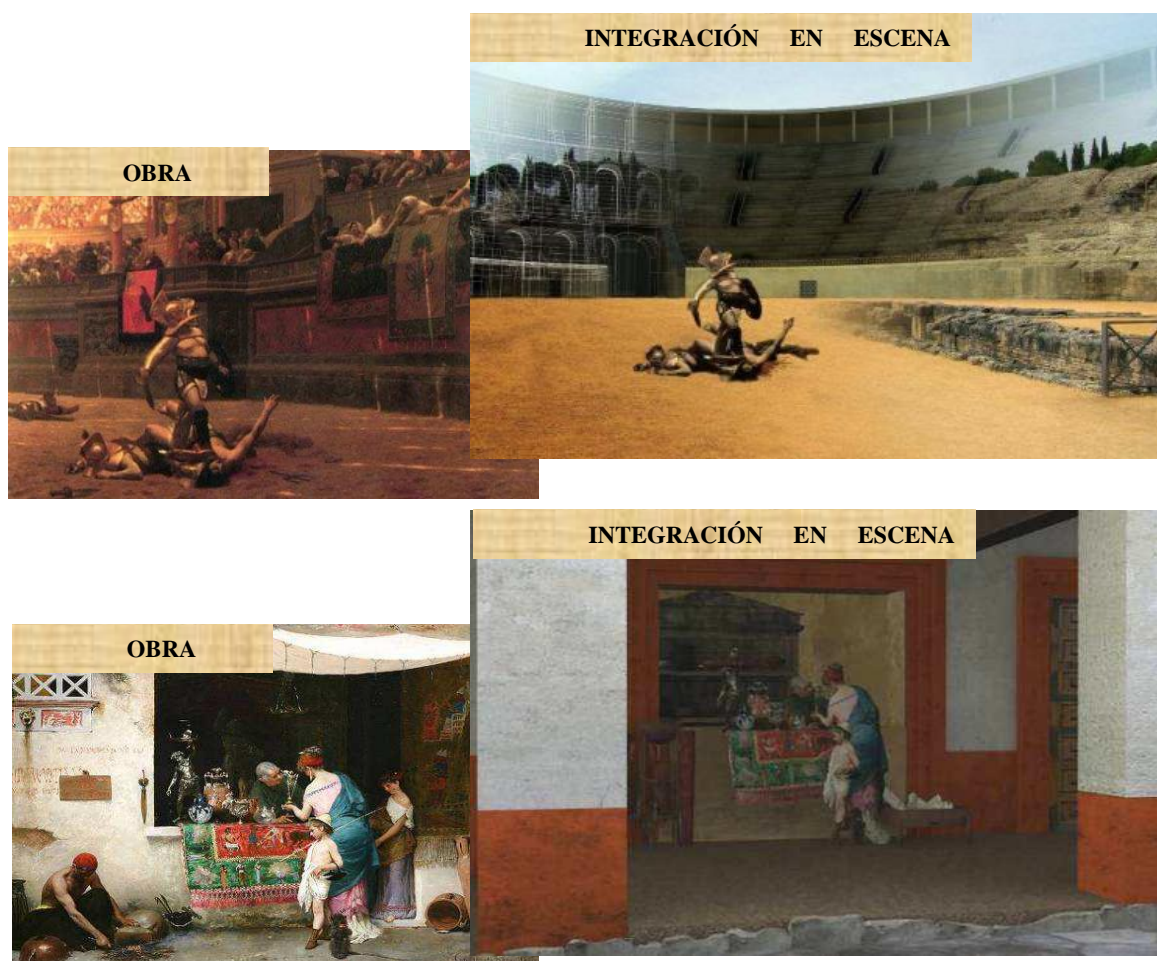


Fig. 210 La pareja de imágenes superior muestra a la izquierda *Pollice Verso* de 1872 de Jean-Léon Gérôme y a la derecha su integración en la escena 3D que ilustra a los gladiadores de un anfiteatro romano. La imagen inferior izquierda muestra la obra *At the antiquarian*, de 1880 de Vincenzo Capobianchi y, a la derecha, su integración en la escena 3D que ilustra una taberna romana. © Alfredo Grande y José Manuel Rodríguez Hidalgo.

El Proyecto de *Interpretación Virtual de Itálica* es la primera hipótesis virtual arqueológica desarrollada integralmente con los principios internacionales que rigen la reconstrucción virtual del patrimonio arqueológico, que serán mas adelante revisados en el capítulo 8 (Grande y Rodríguez Hidalgo, 2011).

Además, de Itálica surgió también el proyecto de consolidación y recuperación de su *Scaenae Frons*, frente escénico de un teatro romano, de modo que el Conjunto Arqueológico planteó la posibilidad de realizar la anastilosis de su frente escénico, del cual conserva un buen número de fragmentos. Esta anastilosis partió de un reconocimiento de los fragmentos arquitectónicos existentes, que habían sido sometidos a varios registros e inventarios, por lo que existía ya una gran cantidad de información organizada en tablas y cuadros con datos muy exhaustivos y signatures y códigos propios de cada investigación.

Para trabajar con los fragmentos, se decidió no introducir un nuevo código que pudiese generar aún más complejidad de registro y lectura, escogiéndose el inventario más completo y complejo. Este último es resultado del trabajo de investigación realizado por la doctora Oliva Rodríguez, con quien se colaboró para identificar con rapidez y seguridad cada una de los fustes, capiteles, basas y cornisas principales, determinando incluso el



Fig. 211 A la izquierda pueden verse numerosos fragmentos y a la derecha uno de ellos, digitalizado.
©Francisco Pinto, José María Guerrero y Roque Angulo.

orden al que pertenecen.

El tamaño, peso y el mal estado de conservación de muchas piezas hizo necesario contar con algún medio que permitiera obtener datos métricos sin manipularlas demasiado y así poder analizar su configuración formal y los posibles solapes. Se trabajó a partir de fotografías tratadas mediante diversos programas informáticos que permiten generar imágenes 3D virtuales, consiguiéndose, además, que cada pieza quedara documentada tridimensionalmente, de modo que la información se incorporase como nuevo documento a las fichas de registro realizadas en estudios anteriores. Además, gracias al escaneado, se pudo realizar un análisis de las piezas comprobando los datos métricos y petrológicos propuestos en los trabajos anteriores. La digitalización se realizó de una manera progresiva, desde las más importantes y enteras a las más fragmentadas, excluyéndose para este trabajo los múltiples fragmentos de pequeñas dimensiones, que afectan menos a la composición de la anastilosis y que precisan de mayor reconocimiento y análisis. El trabajo fue desarrollado en paralelo al inventario y levantamiento gráfico de la escena en su estado actual y se prolongó hasta finalizar la redacción de la propuesta de proyecto para la

ejecución material de la anastilosis. Estudiando en profundidad los fragmentos, se obtuvo la estructura geométrica de las piezas principales que, referenciadas geométricamente, se fueron agrupando y ubicando en el modelo infográfico 3D, introduciendo las correcciones generales propuestas por los trabajos de investigación anteriores. Todos estos elementos no responden a una verificación material en los restos existentes, sino a una filiación tipológica, por lo que su visualización no puede tener el mismo rango que las piezas antes descritas, aunque son imprescindibles para avanzar en su conocimiento. Así, la cubierta de la escena y la elevación del edificio para albergar su estructura portante quedaron recogidas como hipótesis gráficas a nivel informativo y no deben incorporarse a una propuesta de anastilosis. A partir de toda esta información, se realizó un modelo infográfico tridimensional del conjunto, que permitió plantear numerosas hipótesis de montaje. El modelo sirvió tanto para realizar la presentación del objeto al equipo de coordinación de los proyectos, como para trabajar en la identificación y ubicación de las piezas. Con el fin de facilitar la obtención de la planimetría, se prepararon una serie de volcados gráficos en proyecciones ortogonales a diversas escalas que permitieron comprobar las diversas posibilidades de uniones entre piezas y, con ello, facilitar el ensamblaje. De este modo, se obtuvo el desarrollo de distintas versiones, donde se buscó el ajuste más adecuado y mejor documentado, en el que se podrá, en un futuro, ir ubicando todas aquellas piezas que se vayan incorporando al modelo, editando cuantas comprobaciones se requieran.



Fig. 212 Encaje de los fragmentos escaneados.
©Francisco Pinto, José María Guerrero y Roque Angulo.

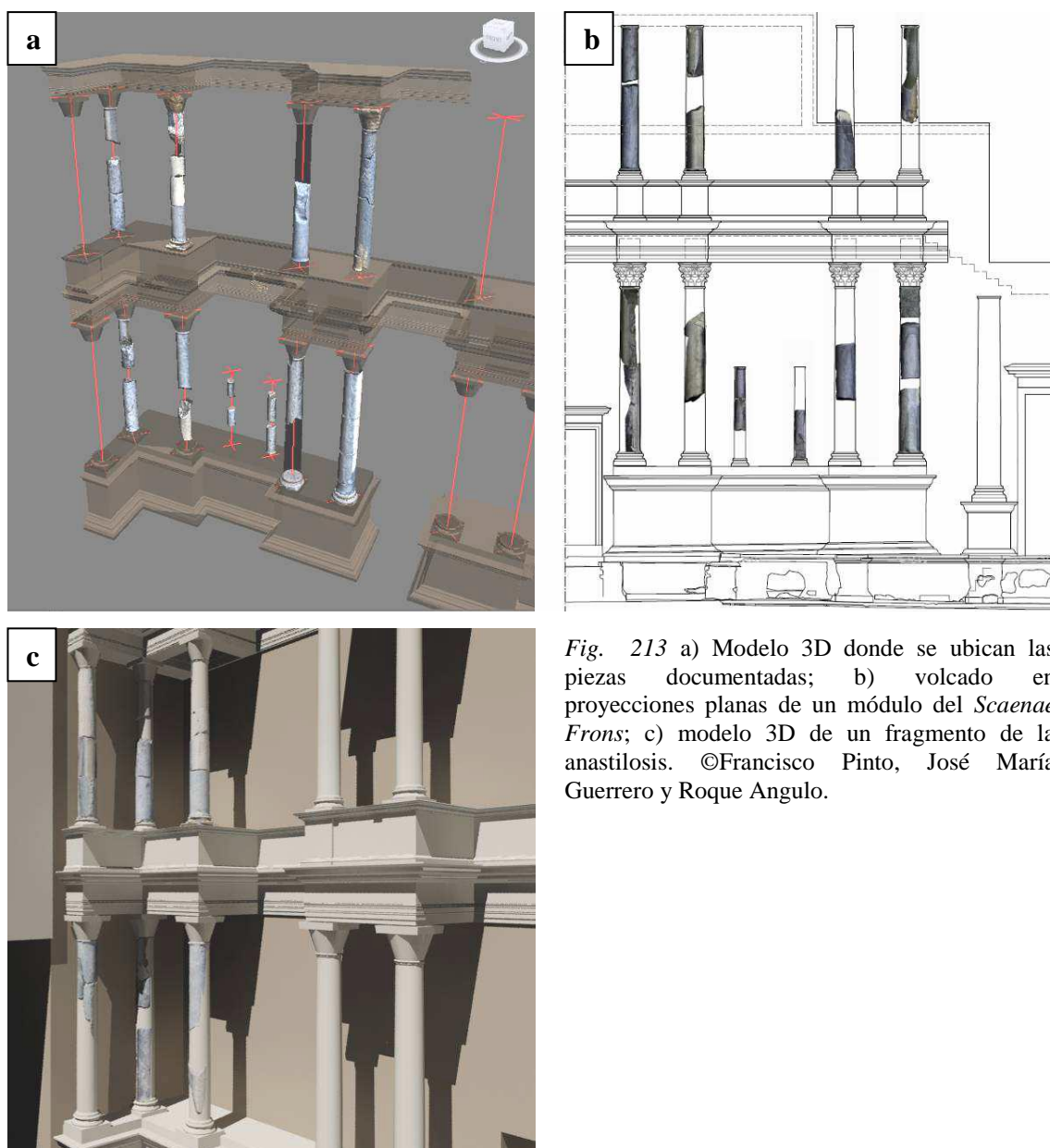


Fig. 213 a) Modelo 3D donde se ubican las piezas documentadas; b) volcado en proyecciones planas de un módulo del *Scaenae Frons*; c) modelo 3D de un fragmento de la anastilosis. ©Francisco Pinto, José María Guerrero y Roque Angulo.

Por último, el modelo fue desarrollado de tal forma que sea posible construir en un futuro un sistema *BIM*, Building Information Modeling⁵¹, de la anastilosis que finalmente se lleve a cabo⁵². De esta forma, toda información actual y futura podrá ser consultada a través del modelo, ya sea esta alfanumérica, gráfica o fotográfica (Pinto, Guerrero, y Angulo, 2011).

⁵¹ Building Information Modeling es una metodología de trabajo colaborativa para la creación y gestión de un proyecto de construcción cuyo objetivo es centralizar toda la información en un modelo de información digital creado por todos sus agentes. *BIM* supone la evolución de los sistemas de diseño tradicionales basados en el plano al incorporar información geométrica, de tiempos, de costes, ambiental y de mantenimiento (Building Smart, s.f.).

⁵² Esta fase está pendiente de desarrollo a través de un proyecto de investigación I+D.

A modo de ejemplo, uno de los primeros proyectos llevados a cabo a comienzos del 90 fue desarrollado entre la Universidad de Teesside y el English Heritage⁵³ para "reconstruir" la sala capitular del Monasterio Cisterciense Rievaulx Abbey en North Yorkshire, Reino Unido, empleando AutoCAD y Autodesk's 3D Studio. El objetivo original del proyecto era determinar si podría haber alguna base para la teoría de que la calidad de la luz en la sala capitular había contribuido a la decisión de dar a la Abadía una orientación inusual. Los monjes de la orden cisterciense medieval consideraban la luz del sol como una manifestación del Espíritu Santo. Por ello, surge la hipótesis de que el grupo de frailes del s. XII buscaba una luz solar concreta con la que iluminar las tareas cotidianas de la vida monástica, siendo este deseo lo suficientemente fuerte como para hacer girar la abadía noventa grados respecto a la orientación eclesiástica convencional, donde el ábside se tendría que haber dirigido hacia el Este. Debía por tanto reconstruirse el interior de la sala capitular para poder recrear la iluminación que debía generarse y determinar así si se justificaba tan dramática ruptura con la tradición religiosa (Kemp, 1995, p.249).

Ya en esas fechas, en el artículo *Three-dimensional reconstruction modelling of standing buildings* donde se desarrolla este proyecto publicado por Deborah Kemp, la autora afirma que un modelo de reconstrucción debe ser un subproducto de la investigación arqueológica, de modo que se empleen estos datos digitales para minimizar trabajos adicionales. De manera ideal las reconstrucciones deberían ser llevadas a cabo por arqueólogos que puedan emplearlas directamente como una herramienta analítica para probar sus teorías y establecerse un circuito de retroalimentación directa. Desgraciadamente, las complicaciones de la época a la hora de reconstruir el edificio dificultaron la obtención de resultados sólidos, aunque esto no invalidó el ejercicio. El proyecto demostró que es razonablemente sencillo para usuarios con relativamente poca experiencia en ordenadores, producir modelos de reconstrucción razonablemente sofisticados empleando lo que en aquel momento eran equipos cada vez más asequibles y empleados por los arqueólogos en sus tareas de investigación, (Kemp, 1995, p.253). El caso es por tanto mencionado fundamentalmente por la importancia que presenta al ser uno de los primeros en emplear programas de modelado 3D con el fin de reconstruir la arquitectura y los interiores de un edificio.

⁵³ English Heritage, oficialmente Historic Buildings and Monuments Commission for England, es un organismo público del Gobierno del Reino Unido, que protege y promueve el patrimonio histórico de Inglaterra.

En el documento pueden verse imágenes de los renderizados obtenidos y las diferencias de luz generadas en el interior modificando la orientación original del edificio. Estos son sorprendentemente de muy buena calidad si se tiene en cuenta que fueron realizadas en los años 90, cuando los gráficos del momento distaban mucho de los actuales.

Por lo que a España respecta, puede decirse que esta técnica fue incorporada de forma temprana, puesto que a finales de los 90 aparecieron las primeras investigaciones de patrimonio que emplearon reconstrucciones virtuales. Así el primer centro público en el que se realizaron estas prácticas fue la Escuela de Estudios Árabes de Granada del CSIC en 1990, por parte de José Antonio Fernández y Antonio Almagro, que comenzaron con el proyecto de reconstrucción de la *Dar al Yund* de *Madinat al-Zahra* en Córdoba (Almagro, Almagro Vidal, Fernández y González, 2004; Almagro y Fernández, 1995, citados en Gómez Robles y Quirosa, 2009, pp.7 y 8).

La etapa inicial de las reconstrucciones virtuales, como suele ser común en todo proceso de restauración, consiste en revisar exhaustivamente las fuentes documentales del objeto de estudio y/o intervención. Posteriormente, cuando se va a realizar una reconstrucción virtual de patrimonio arqueológico, se procede a un minucioso levantamiento de planimétrico del bien, o se emplea el archivo ya disponible en caso de que este levantamiento ya haya sido realizado con anterioridad. Es en ese momento cuando comienzan a surgir las hipótesis reconstructivas. Solo en una última etapa el modelo tridimensional es elaborado, comprobándose las hipótesis reconstructivas a la vez que pueden surgir nuevas propuestas (Fabregat et al., 2012; Gómez Robles et al, 2010; Vico 2011, citados en Cruzalta, 2013, p.38).

Numerosos son los casos que pueden citarse de reconstrucciones de patrimonio arquitectónico que no se materializan. Como ejemplo, puede mencionarse la importante fábrica de mosaicos que apareció en Meliana, Valencia, a mediados del s. XIX y que desempeñó un papel fundamental en la historia de la industrialización española. Allí se encuentra el emblemático *Palauet Nolla*, edificio arropado por un extenso conjunto de naves que, convertido en un muestrario a tamaño real, fue adornado con las más exquisitas composiciones que permitía el producto que salía de los hornos melianeros. El estudio realizado incorporó información completa sobre este hito histórico-artístico, siendo uno de los elementos más relevantes y llamativos su restitución virtual completa.

El primer paso de este trabajo fue realizar el levantamiento métrico del mismo con técnicas tradicionales: una vez se conocía la sección y el alzado, se escanearon para poder sectorizarlos e introducirlos en un programa de CAD. Se pudo así confirmar la verticalidad de la torre del edificio, la rectitud de los muros originales y observar hasta las más leves deformaciones sufridas tanto por los forjados como por los paramentos verticales. Posteriormente, se realizó el levantamiento fotogramétrico y, para la obtención de las coordenadas del edificio, se empleó una estación láser. El levantamiento de los mosaicos permitió documentar fielmente las diferentes composiciones que los grupos de mosaicos existentes en el edificio formaban. Así, gracias a la exhaustiva catalogación y al estudio realizado a las diferentes teselas se determinó la disposición final de los mosaicos de cada estancia. Esto es fundamental puesto que no todos se encuentran en perfecto estado de conservación y solo con la investigación se pudo interpretar el estado inicial de los mismos mediante el estudio de su geometría, así como con la ayuda de fotografías antiguas, investigación histórica y bibliográfica, etc.

Este estudio, además de proporcionar información académica, es imprescindible para plantear el tipo de intervención que se debe realizar a la hora de llevar a cabo la restauración del bien, sabiendo con exactitud el nivel y naturaleza del deterioro, la cantidad de material faltante, o su ubicación y características.

De este modo, la restauración virtual del edificio necesitó recurrir a tres aplicaciones informáticas que se utilizaron de forma complementaria, cada una en una etapa del proceso: Autocad (CAD), 3dStudio (3DS) y Photoshop.

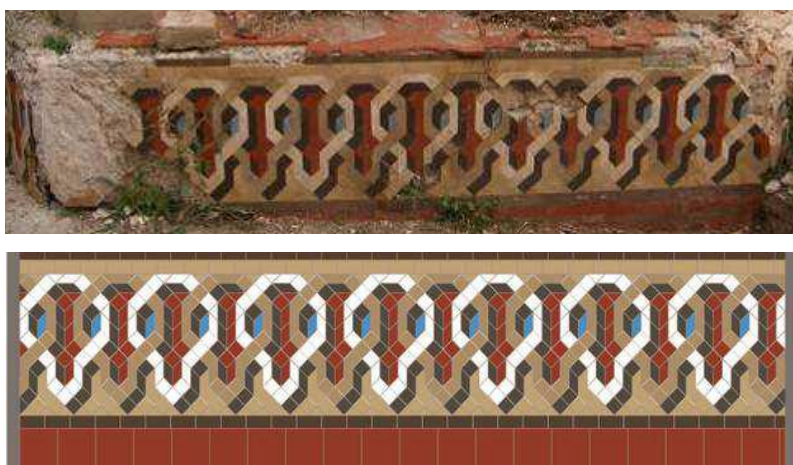


Fig. 214 Ejemplo de restitución de zócalo. En la imagen superior la fotografía del zócalo y su estado de conservación, y abajo el modelo restaurado virtualmente. ©Xavier Laumain, Angela López Sabater, Jorge Ríos Alós y Carlos Huerta Gabarda.

En este caso los numerosos elementos decorativos, no solo los cerámicos, presentes en el edificio provocan un considerable aumento del peso específico de los

archivos, por lo que se optó por crear dos modelos: uno detallado con el fin de incluirlo en la ficha descriptiva de cada moldura; y otro simplificado, empleado para el modelo virtual completo. Este último se realizó mediante el empleo de una imagen aplicada sobre un volumen básico ligeramente modelado para que transmitiese la suficiente sensación de volumen que aportase realismo a la imagen, sin dilatar los tiempos de renderizado.

Los resultados permiten obtener vistas y conjuntos de información imposibles de representar mediante otros métodos, y cuya visualización facilita la comprensión del edificio, particularmente de sus fases de evolución más complejas. El modelo permite disponer de una información gráfica fundamental para transmitir datos técnicos mediante canales visuales. Se realizaron además modelos esquemáticos de cada una de las fases de evolución del conjunto durante sus cuatro siglos de historia, permitiendo el aumento de la comprensión por parte de todo tipo de público y permite, a su vez, disponer de una base con la que desarrollar una visita virtual (Laumain, López Sabater, Rios y Huerta, 2012). No puede dejar de mencionarse que cuando llegue el momento de realizar la intervención sobre el inmueble para restaurarlo, la documentación 3D existente será de gran apoyo y ayuda para los restauradores que podrán ver el modelo restaurado virtualmente antes de intervenir.



Fig. 215 A la izquierda aparece el estado actual de la torre Miramar de la fábrica y, a la derecha, la restitución virtual de la parte superior de la misma. © Xavier Laumain, Angela López Sabater, Jorge Rios Alós y Carlos Huerta Gabarda.

Existen numerosos proyectos en los que las reconstrucciones virtuales han constituido la única opción de intervenir sobre el monumento, al menos a día de hoy, devolviéndoles su integridad física.

También como ejemplo puede citarse el antiguo templo egipcio de Kalabsha, del año 30 a.C. que en 1963 fue desmantelado y trasladado a una nueva ubicación con el fin de salvarlo de las aguas ascendentes del lago Nasser. Gracias a las técnicas 3D, se ha conseguido un modelo en el que puede verse su ubicación y orientación original, e iluminarlo, tal como era hace unos 2000 años (Sundstedt, Chalmers & Martínez, 2004).

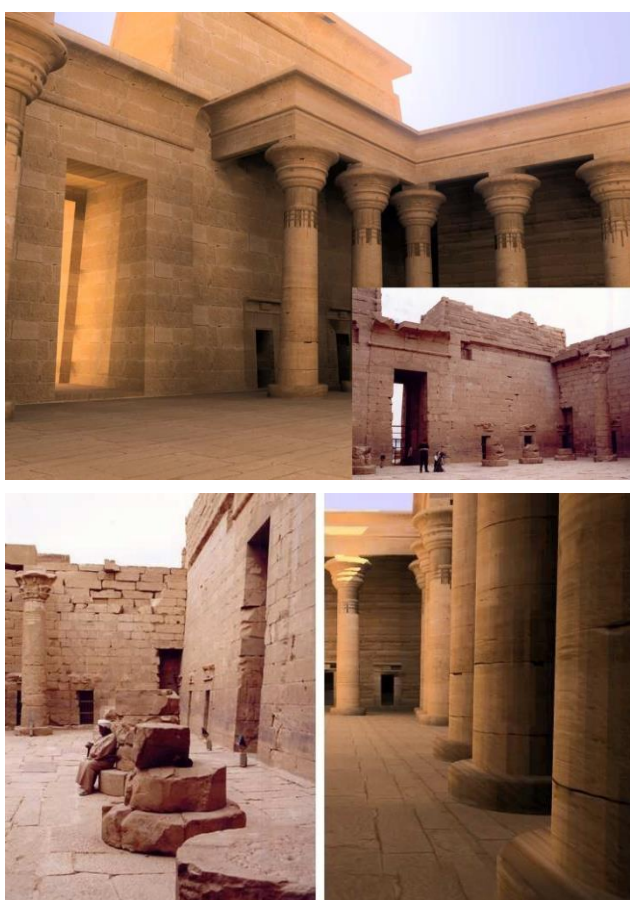


Fig. 216 En ambas parejas de imágenes puede verse por un lado el sitio tal y como se encuentra en la actualidad y por otro, la misma zona reconstruida virtualmente. Verónica Sundstedt, Alan Chalmers & Philippe Martínez.

Otro caso surge en España a partir del hallazgo de un *mithreum*, lugar de culto dedicado al Dios Micra, y una *domus*, o vivienda romana, en el Pazo de Montegro de la ciudad de Lugo. El proyecto es explicado en el artículo publicado en 2012 por Alicia Colmenero Fernández y Celso Rodríguez Cao *Anastilosis Virtual de A Domus Do Mitreo De Lvcvs Avgvsti* (Colmenero y Rodríguez Cao, 2012).

El proyecto se apoyó en la aplicación de las nuevas tecnologías para la documentación y difusión del patrimonio, en el que se muestra un recorrido virtual del espacio arquitectónico reconstruido en 3D. A finales de los 90 se realizaron las obras de rehabilitación y acondicionamiento del Pazo de Montenegro y anexos con el fin de albergar la actual Casa do Saber. A raíz de estos trabajos y, tras una fase de sondaje positiva, se realizó una excavación arqueológica sobre sus más de 600 metros cuadrados. El equipo sacó a la luz las primeras evidencias que demostraron una ocupación del 27 a.C al 284 d.C., apareciendo así los primeros signos de trazado de una gran *domus* y el *mithreum*. Según las investigaciones realizadas, este último constituye uno de los pocos monumentos mitraicos de España que pueden ser datados con fiabilidad en el siglo III d.C y se mantienen funcionales a lo largo del siglo IV d.C. La *domus*, en cambio, fue en el siglo IV d.C drásticamente afectada por la construcción de la muralla de Lugo.

De este modo, tomando la base de estos hallazgos y dentro de un proyecto de tecnologías aplicadas para la documentación y difusión del patrimonio, se desarrolló un plan de actuación dentro del marco deontológico planteado por la SEAV (Sociedad Española de Arqueología Virtual)⁵⁴ para la consecución de una hipótesis virtual defendible con un nivel de certeza elevado. Un equipo interdisciplinar trabajó en la recopilación de datos materiales, análisis tipológico y estadístico de los datos recabados y, finalmente, en la elaboración de conclusiones dentro un plan general de investigación integral del monumento arqueológico. El trabajo se desarrolló dentro de la línea recomendada de la Carta de Londres⁵⁵ y, tras la elaboración del marco teórico, se desarrolló una hipótesis virtual seleccionándose el momento inmediatamente anterior a la construcción de la muralla, en donde la casa se encontraba ya deshabitada mientras que el *mithreum* todavía continuaba en uso. Para ello se siguieron los siguientes criterios en la reconstrucción de los elementos parcialmente conservados o no, pero incluidos en la hipótesis:

- Criterio de continuidad para el patio porticado, del que se conservan parcialmente elementos como basas, columnas, enlosado, y para la estructura y suelo del interior del mitreo.
- Criterio de analogía tipológica y restitución para la reconstrucción de una segunda altura de la *domus*, techumbre del corredor, estatua de mitra, soportes estructurales del *mitreo*, altar, bancos laterales y soportes lumínicos.

⁵⁴ Esta sociedad será revisada en el capítulo 8.

⁵⁵ Las cartas y leyes serán en el capítulo 8 revisadas.

- Criterio de simetría aplicable a toda el área no excavada de la parte oeste del patio.



Fig. 217 A la izquierda puede verse la reconstrucción virtual que representaría una de las estancias decoradas y a la derecha la hipótesis reconstructiva del interior del *mithreum*. ©Alicia Colmenero y Celso Rodríguez Cao.

En la fase de *shading* o sombreado del proceso de virtualización, se elaboraron distintas tipologías de texturas: las propias de los elementos conservados; texturas incompletas o destruidas intervenidas por restauración digital y texturas propias de objetos análogos. También se reconstruyó una estatua a partir del hallazgo de una serie de fragmentos de bronce que fueron identificados como los probables restos de la estatua del dios Mitra.

Por su parte, en referencia a las técnicas de retrodeformación anteriormente citadas, puede destacarse uno de los casos más importantes que ilustran el empleo de las tecnologías 3D para el estudio, conservación y restauración de fósiles. Constituye la investigación publicada en 2014 que tiene como protagonista al cráneo de *tericinosaurio*⁵⁶ más completo y mejor conservado hasta el momento. El *tericinosaurio* tendría unos 3-4 m de longitud, vivió hace unos 90 millones de años y fue descubierto en 1972 en el sudeste de Mongolia. Ahora, el equipo dirigido por Stephan Lautenschlager de la Universidad de Bristol ha conseguido desarticular digitalmente dicho cráneo en sus elementos individuales, a los que posteriormente se les ha aplicado la técnica de retrodeformación.

⁵⁶ Los tericinosaurios son dinosaurios terópodos verdaderamente singulares, empezando por el hecho de que, contrariamente a lo que le correspondería, no son carnívoros sino comedores de plantas. Más aún, su cadera tiene el pubis orientado hacia atrás, como sucede con los ornitiskios, a pesar de que -en su calidad de terópodos- pertenecen al grupo de los saurisquios. Y, aunque tienen otras particularidades anatómicas, hay que destacar la posesión de unas descomunales garras en sus extremidades anteriores.

Además, han rellenado las grietas y fracturas del fósil original, duplicado los elementos que faltaban y eliminado las deformaciones que presentaba. En la publicación se describe detalladamente cada uno de los huesos del cráneo y, entre los resultados presentados, cabe resaltar las evidencias que demuestran la existencia de una ranfoteca en el premaxilar y en el dentario, es decir, un estuche córneo que conforma un pico. Los investigadores presentan dos posibles interpretaciones acerca del tamaño de ese pico: en una de ellas cubriría el premaxilar y parte del maxilar (tapando parcialmente los orificios nasales), mientras que en la otra hipótesis solamente cubriría las zonas laterales y rostral del premaxilar.

Tras el estudio, la especie *Erlikosaurus andrewsi* presenta el conjunto de rasgos anatómicos que la caracterizan de manera mucho más precisa.

Como puede observarse, gracias a las tecnologías 3D también es posible acceder a estructuras internas ocultas al ojo humano y se permite replicar la información contenida en el hueso en un soporte digital que resulte accesible y almacenable simultáneamente en diversos repositorios (Alcalá, 2014; Lautenschlager, Witmer, Altangerel, Zanno & Rayfield, 2014).

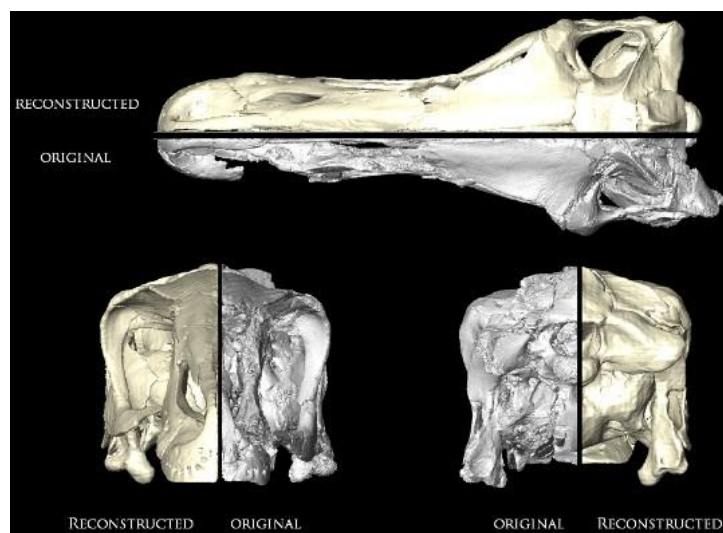


Fig. 218 Comparación entre un cráneo original de *Erlikosaurus andrewsi* y su restauración digital. ©Stephan Lautenschlager, Lawrence M. Witmer, Perle Altangerel, Lindsay E. Zanno & Emily J. Rayfield.

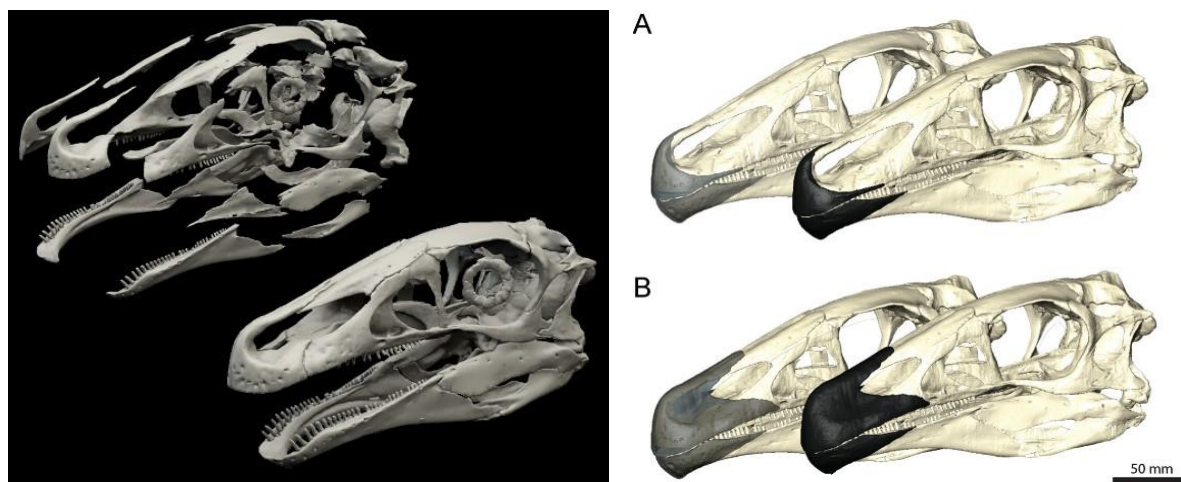


Fig. 219 A la izquierda aparece la imagen de la restauración digital del cráneo, que permitió desarticularlo para estudiar con detalle la morfología de cada uno de sus componentes. A la derecha aparecen las dos hipótesis para la reconstrucción de la ranfoteca de *Erlikosaurus andrewsi*: con un pico queratinoso pequeño (A) o grande (B); en segundo plano, el pico ha sido representado de modo transparente para que se aprecien los huesos del cráneo que lo soportan. ©Stephan Lautenschlager, Lawrence M. Witmer, Perle Altangerel, Lindsay E. Zanno & Emily J. Rayfield.

Además de las visualizaciones a partir de webs o archivos 3D, los modelos digitales 3D pueden focalizarse por medio de cañones proyectores que complementan o emulan policromías sobre concretas zonas de las obras ya sea en interiores o bien en exteriores nocturnos.

Por medio de cañones proyectores pueden focalizarse, tanto modelos digitales tridimensionales con textura artificial, como videoproyecciones sobre zonas concretas del emplazamiento elegido para complementar o emular policromías.

Uno de los ejemplos más famosos y conocidos es el caso de los *Budas de Bayiman* que esculpidos en la piedra en el s. VI, cuando la ciudad era un lugar sagrado para los budistas, fueron destruidos mediante explosivos por los Talibanes en el año 2001. Las dos estatuas más prominentes medían 55 y 37 metros de alto y, para finalizar la destrucción, los Talibanes necesitaron 25 días de explosiones diarias. Catorce años después tomaron forma de nuevo durante dos días gracias a una proyección en tres dimensiones y lámparas halógenas para mostrar imágenes de las esculturas con gran buena calidad en los nichos que ocupaban los budas en la pared de roca. En Afganistán se debaten entre destinar fondos para reconstruir los budas, generando de nuevo ingresos por el turismo en la zona, o bien dejar el sitio devastado como recuerdo del vandalismo del Talibán (Behzad y Qarizadah, 2015; Efe, 2015).

Estas proyecciones facilitan también las restauraciones, mostrando cómo era originalmente el objeto de estudio, emulando el resultado de la actuación prevista o guiando el proceso de dicha actuación y simular



Fig. 220 Estado actual de uno de los nichos. ©AFP.

las etapas por las que la obra ha pasado y sus deterioros. Por supuesto, las luces proyectadas tienen una intensidad lumínica no perjudicial al soporte material sobre el que se proyecta (Martín, Llamas y Perán, 2013, pp.80-82).

Para ello, se realiza un modelo 3D previo a la intervención con el que es posible calcular el posicionamiento y la óptica del/os cañón/es proyector/res, eliminándose por tanto la necesidad de desplazamientos y dificultosas mediciones *in situ*. Dicho modelo digital puede además emplearse para crear una videoproyección (Matín et al., 2013, p.81).

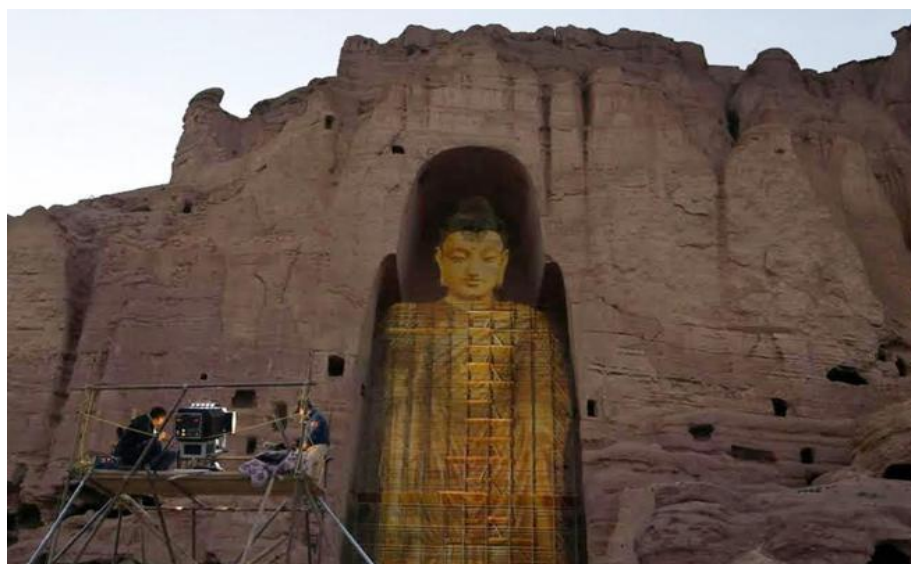


Fig. 221 Imagen proyectada de la estatua de Buda en Bamiyán destruida por los talibanes. © Kamran Shafayee.

De este modo surge esta nueva técnica de restauración y simulación de policromías en 3D sobre bienes culturales, en las que sin realizar intervención física alguna sobre las obras, se puede emular la policromía original que la obra tenía, su evolución en el tiempo, o mostrar diferentes aspectos de carácter divulgativo y didáctico (Martín, Llamas, Gómez García-Bermejo, Zalama y Castillo, 2010). Por ello, dado el fuerte carácter didáctico y divulgativo que presentan estas técnicas, es preciso que sean más adelante también incluidas en el capítulo 7, donde se incluirán también otros ejemplos.

Un buen ejemplo de este enfoque es la restauración virtual del pórtico de la catedral de *Santa María* de Vitoria en España. El modelo 3D restaurado de una escultura policromada de la Virgen, fue proyectado sobre el original, de modo que la obra se presentó con su policromía original sin someterse a intervención alguna. En este caso, la proyección del modelo 3D policromado se producía sobre una superficie geoméricamente muy irregular, lo que implicó que las texturas del modelo debían coincidir perfectamente con el objeto real, razón por la cual hubo que escanear la obra, con el fin de conseguir su modelo 3D y trabajar sobre este.

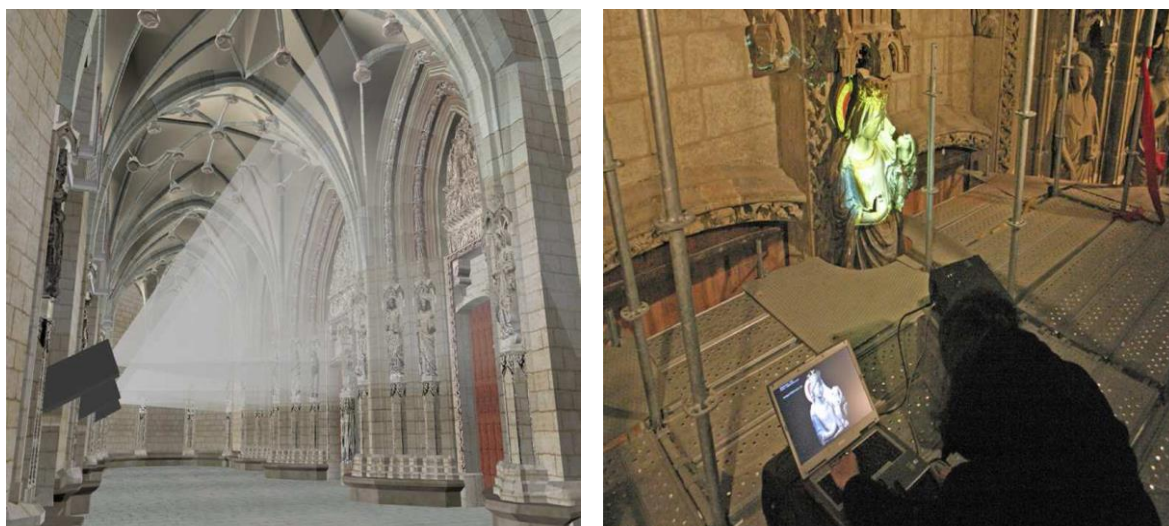


Fig. 222 A la izquierda aparece el pórtico de la catedral de Santa María y el estudio realizado relativo a la posición de los faros y los haces de luz en el modelo 3D. A la derecha se está realizando el test de proyección del modelo 3D sobre la imagen de la Virgen. ©Rosa Peral, Diego Sagasti & Sara Sillaurren.

Para proyectar el resultado correctamente sobre el conjunto escultórico, el tipo y la posición de los proyectores debía estudiarse en profundidad, por lo que se creó también el modelo 3D del pórtico que fue empleado en la simulación y proyección virtual, para analizar los efectos de las posibles y diferentes configuraciones. Este hecho contribuyó directamente a la disminución de los errores de distorsión en la proyección directa, ya que habían sido fijados de antemano en el modelo 3D todos los parámetros (Peral, Sagasti & Sillaurren, 2005).

Por último, otro ejemplo fundamental es el caso del evento realizado en 2014 en el *Ara Pacis*. Durante la intervención, se proyectó directamente sobre el altar en mármol algunas de las hipótesis existentes sobre el color original del monumento, con el fin de lograr el efecto realista de la policromía original (Garofalo, 2015).



Fig. 223 Imagen del evento *Colori dell'Ara Pacis* en el *Ara Pacis* de Roma en 2014. ©Museo dell'Ara Pacis.

Capítulo 6. Empleo de las tecnologías 3D para la realización de reproducciones del patrimonio cultural

Otra de las aplicaciones que las nuevas tecnologías presentan para el patrimonio es el empleo de los datos para producir una reproducción no virtual, es decir, una reproducción física. Tal y como se verá en el presente capítulo, la realización de reproducciones de bienes culturales ha servido para múltiples fines a lo largo de la historia. Sin embargo, hoy en día estos usos no solo se mantienen, si no que con la implicación de las tecnologías 3D para su obtención, se ha ampliado espectacularmente la calidad de los resultados obtenidos, y, en consecuencia, nuevas posibilidades y aplicaciones han aparecido.

6. 1 Copia, facsímil, reproducción y réplica. Definiciones y antecedentes

A pesar de que el empleo de copias de obras patrimoniales en el ámbito de la conservación de bienes culturales ha ido proliferando en los s. XX y XXI, la percepción general del público no suele ser del todo positiva, puesto que existe, entre otros factores que serán de aquí en adelante desarrollados, una devaluación del concepto (Herrero-Cortell, 2016, p.11). Numerosas instituciones menosprecian la obra no original, debido en gran parte a la generalizada confusión de la terminología que se refiere a estos elementos. Con frecuencia el facsímil es confundido con la copia, cuando estas últimas pueden tener en realidad desde una baja calidad hasta resultar muy fidedignas.

Cuando se da esta última circunstancia pueden denominarse entonces facsímil, réplica o reproducción y se trata en este caso de copias de altísima calidad, que transmiten con exactitud y veracidad la información del objeto reproducido (Matía, 2009, pp.101 y

102)⁵⁷. La RAE, Real Academia de la Lengua Española, describe el término “copia” como una obra de arte que reproduce fielmente un original (Rae, s.f. a). Sin embargo, lo cierto es que esa copia (por ejemplo, de una pintura) puede realizarse de manera manual, mientras que la réplica, reproducción o facsímil están más relacionados con el empleo de medios mecánicos o sistemas de reproducción.

De este modo la realización de una reproducción implica tratar de que sea idéntica al original. Por ello, el concepto puede equipararse al de facsímil o al de réplica. En el proceso de conformado de una reproducción se emplean procedimientos mecánicos, calcográficos, electrolíticos, fotolitográficos o también el vaciado, moldeo y galvanoplastia, con lo que la reproducción resulta más fidedigna que la copia. Por ello, es fundamental diferenciar estos conceptos por los usos e implicaciones estéticas, técnicas, éticas y leales que la copia y la reproducción tienen en el campo de la conservación y la restauración (Macarrón y González, 2011, pp.44 y 45).

Actualmente existen numerosas utilidades de las reproducciones en el ámbito de la conservación, tal como se indicará más adelante, pero no se puede obviar que también son motivo de polémica por su uso asociado a falsificaciones, a atentar contra la autenticidad del arte y debido a que pueden surgir problemas legales asociados a la Propiedad Intelectual.

El empleo de facsímiles de obras de arte en Museología implica que, muchas veces, la réplica adquiere una gran dimensión, especialmente cuando el original muestra un deficiente estado de conservación o se halla en paradero desconocido, o pertenece a un ente privado (Ávila, 2003, p.20).

La presencia en la lengua griega y latina de términos como *mimema*, *apógraphon*, *exemplum*, que se pueden traducir como "imitación", "copia" y "modelo", indican que el concepto de copia como reproducción intencionada y consciente de un modelo existe desde la Antigüedad (Negrete 2003, p.77).

⁵⁷ La RAE establece las siguientes definiciones:

- Facsímil: perfecta imitación o reproducción de una firma, de un escrito, de un dibujo, de un impreso, etc (Rae, s.f. b).
- Réplica: copia exacta de algo, especialmente de una obra artística (Rae, s.f. c).
- Reproducción: cosa que reproduce o copia un original (Rae, s.f. d).

Como ya ha sido explicado, el término “copia” suele ser evitado, debido a las connotaciones que negativamente se le han atribuido a lo largo de la historia. Uno de los motivos que lleva la copia al terreno de lo negativo es la aparición, durante los primeros años del s. XX, de la especulación fraudulenta con piezas copiadas en el mercado del arte. Un relevante ejemplo constituye los fundidores, entre los que se encuentra Barbédienne en París, que ofrecía masivamente copias de esculturas tan conocidas como *El Apolo de Belvedere* o *La Venus de Milo*, en distintos tamaños y materiales, que dio lugar al menosprecio generalizado de la copia (Estella, 2001, pp.125-128).

Con referencia de nuevo a este término, se ha de recalcar que, contrariamente a la opinión generalizada, una copia de una obra antigua no tiene por qué constituir en absoluto una falsificación, ya que ha sido usual a través de la historia del arte su realización, siendo especialmente conocidas las romanas realizadas de las esculturas griegas, que han adquirido una dimensión histórica tal, que hoy en día se consideran tan valiosas como los propios originales (Estella, 2001, p.125). En este sentido, se ha de recordar también el papel que jugaron en la sociedad romana culta, que consideraba como signo de distinción el decorar las grandes villas, palacios y jardines con reproducciones de las obras de arte griegas que fueron llamadas "copias" (Negrete, 2003, p.78).

Durante la Edad Media y Renacimiento, se produce la demanda intensiva de copias de modelos clásicos para colección y estudio, generalizándose la consideración del valor de la copia como medio o vehículo de innegable utilidad para la construcción social de la cultura artística; implantándose la copia como uno de los medios más usuales y apreciados del oficio y del mundo del arte occidental (Sauras, 2003, p.90). Así, en el Renacimiento, todos los tratadistas de la época expresan la necesidad de que el aspirante a artista realice copias, bien a partir de la naturaleza, bien de las obras de los grandes maestros (Estella, 2001, p.125).

Continuando con el tema de la realización de copias y el valor e importancia de su realización, a lo largo de la historia los artistas han copiado composiciones de otros, no sólo a fin de ejercitarse como artífices, sino también para aprovechar esas obras copiadas en sus propias composiciones. En 1990 el Museo del Prado adquirió tres cuadernos de dibujo del pintor José del Castillo. Aunque procedentes de una colección privada sin

conexión con el artista⁵⁸, se le atribuyen por las firmas de las primeras hojas de cada uno de ellos y el estilo de sus dibujos. Los cuadernos constituyen un raro ejemplo de cuaderno de artista de su segundo viaje por Italia, ya que presentan gran interés artístico y documental.

En ellos, el artista plasma los intereses estéticos de su tiempo. En todos estos cuadernos de Italia los jóvenes pintores, aún con su carrera por hacer, dibujan las formas de los artistas del pasado, que suponían una fuente inagotable y siempre rebosante de figuras, expresiones, actitudes y composiciones. Castillo se dedicó en sus cuadernos a copiar numerosas obras de arte, siendo la gran mayoría de los cuatrocientos cuarenta y cuatro dibujos estudios de figuras y composiciones vistas en Roma. Los maestros del clasicismo romano del s. XVII, constituyen un número elevado de lo copiado por Castillo, pudiéndose identificar copias de Rafael, Annibale Carracci, Pietro da Cortona, Maratta, Niccolò Berretoni, etc. De la estatuaria barroca Castillo tomó muchos ejemplos más (Mena, s.f.).

Por tanto, la copia fue entendida en algunos momentos de la historia como un duplicado del original con idéntico valor, por lo que constituía otra forma de posesión y disfrute de este, llegando a estar tan valorada o más que él. De este modo, en determinados periodos la copia fue entendida como arte y pasaron a ser preciados objetos coleccionables (Herrero-Cortell, 2016, p.11).

Hasta la Ilustración, el ideal de autenticidad y original no se presentaba como una característica relevante para la obra, ya que, tanto con la copia como con su reproducción, quedaba satisfecha la apreciación de una obra. Es en el s. XIX cuando el valor de lo original se instaura y asocia a un prestigio social, menospreciándose aquello que no goce de dicha originalidad (Berjano y Fernández Colón, 2003, p.85).

Todo ello conlleva que gran parte del valor de la obra artística se apoye en la unicidad del objeto creado a través del culto al autor, a lo auténtico e irrepetible, que efectivamente pesa culturalmente sobre una gran parte de Occidente, cultura que valora especialmente la singularidad. Esta circunstancia ha limitado y limita la realización de reproducciones, carente de esa exclusividad (Berjano y Fernández Colón, 2003, p.85).

⁵⁸ El uso de este tipo de cuaderno, en italiano llamado *taccuino*, era común y generalizado, especialmente en Italia. Comenzó a utilizarse desde el s. XV en el Renacimiento. Eran de pequeño formato, ligeros y con un número no muy elevado de hojas, para que el artista lo llevase siempre encima y pudiese hacer uso de él siempre que considerase oportuno (Mena, s.f.).

Para Walter Benjamin⁵⁹, la copia no presenta en absoluto connotaciones negativas; y el concepto aurático que convierte la obra de arte original en algo único e irrepetible, se cuestiona. De hecho, la famosa aura definida por Walter, que tanta controversia acarrea, no deriva del hecho de que la obra sea única, sino de la función de culto a la que, desde los orígenes del arte, estuvieron dedicadas gran parte de las imágenes, convirtiéndose en un halo casi divino. Dicha aura no se presenta como aspecto especialmente imprescindible en la obra, ya que “por primera vez en la historia, la obra de arte se emancipa de su existencia parasitaria dentro del ritual” (Walter, 2010, p.22). De este modo, que el arte se haya mantenido al servicio del ritual, del culto, a modo de parásito, hace que se presente como cualidad retrógrada y, considerando su vinculación a las teorías marxistas, esto no es valorado positivamente, ya que el arte ha de ser progresista.

“La posibilidad técnica de reproducir la obra de arte modifica la actitud de la masa ante el arte. De retrógrada, por ejemplo, ante un cuadro de Picasso, pasa a ser progresista, por ejemplo, ante una película de Chaplin” (Walter, 2010, p.42). Por tanto, el autor considera que la copia tiene un sentido positivo, ya que las clases deben ser abolidas, y el patrimonio común permite que el arte se acerque a las masas.

En los s. XX y XXI, los avances realizados en el campo de la fundición y seriado de piezas en metal, así como la aparición del pantógrafo y otras técnicas de reproducción, dan lugar a que la condición de pieza única de muchas obras, e incluso su originalidad, sea cada vez más ambigua (Sauras, 2003, p.90). Por ello Rosalind Kraus (1996) afirma que:

El asunto de las reproducciones escultóricas, de la múltiple existencia potencial de la escultura enfrentada a la resuelta unicidad de la pintura, plantea cada vez mayores problemas a los críticos. La copia no es simplemente un problema moral, como refleja el término francés para los derechos de reproducción: *droit moral*. La copia es una cuestión plenamente estética, un asunto que una vanguardia heredera de la defensa romántica que la originalidad ha reprimido durante mucho tiempo. (pp.142 y 143)

⁵⁹ Walter Benjamin (1892 –1940), filósofo, teórico estético y crítico alemán (Biografías y vidas, s.f.).

Por lo que al arte contemporáneo respecta, existen series muy numerosas de obras realizadas en muy diversos tipos de materiales y se generalizan las versiones, es decir, variaciones similares de un mismo diseño que puede haberse realizado con diversos materiales. Incluso en estos casos aparecerá el número de la pieza con respeto al de la serie total de obras. Todo ello da lugar a que a lo largo el s. XX crezca la preocupación por conceptos como la autenticidad, ya que aparece un mercado de objetos que son derivados de otros, pero al mismo tiempo, auténticos y originales (Jones, 1992, pp.7 y 8).

Esta incipiente preocupación por tales conceptos se entiende si se recuerda que, en los años 60 y 70 hubo un auge de la fabricación de réplicas y reconstrucciones de multitud de obras. En ese momento lo que se replicaban eran las obras de las décadas de 1910 y 1920 que tendían a desaparecer. Para la generación de directores de museos y conservadores, la recuperación de esas obras escultóricas perdidas fue valiosa por razones básicamente educativas (Mundy, 2007).

Los escultores del siglo XX emplearon en sus obras, cada vez con más frecuencia, nuevos materiales de los cuales desconocían sus cualidades; su degradación y envejecimiento les eran totalmente desconocidos. Ello condujo a que no fuesen capaces de prever la velocidad y el grado de deterioro de sus obras, por lo que éstas tuvieron una vida muy limitada (Skowranek, 2007).

Uno de los ejemplos que mejor ilustra estas prácticas es la obra del escultor Naum Gabo, para quien la cuestión de hacer réplicas, copias y reconstrucciones fue una constante a lo largo de toda su vida profesional.

Para Naum Gabo, la producción de réplicas de aquellas esculturas que se han perdido para siempre por la degradación de sus materiales contribuía a la difusión de la obra y mantenía vivo el trabajo de los artistas (Beerens, 2007). Como muchos de los escultores que trabajan en Rusia durante el período revolucionario, utilizó en numerosas ocasiones materiales utilizados en la industria y de los que no se tenían nociones exactas sobre su envejecimiento o carácter más o menos perdurable, todo ello con la intención de utilizar en su obra materiales que él consideraba especialmente “modernos” o atractivos debido a que en ese momento lo eran (Lodder, 2007).

Fue uno de los artistas pioneros en el empleo de los primeros polímeros transparentes en el ámbito de la escultura. Estos materiales, nitrato y acetato de celulosa, o polimetil metacrilato fueron utilizados en múltiples ocasiones. A veces las obras realizadas

con los polímeros semisintéticos se degradaban con cierta rapidez, con lo que el propietario de la obra de Gabo pedía al artista que restaurara la obra, lo cual podía traducirse en que el artista realizara una nueva.

Todo ello conlleva que algunos de sus trabajos se hayan deteriorado, ya que el nitrato y acetato son materiales especialmente frágiles, de modo que la necesidad de realizar réplicas de su obra fue una dinámica constante de su actividad creativa. Ello confirma así que no otorgaba gran importancia a la noción de obra de arte original, ni tampoco a la identidad del ejecutor, ya que él mismo empleó ayudantes y, particularmente a partir de 1960, sus obras no fueron realizadas por él sino por su asistente, bajo su supervisión. Desde el principio, él mismo hizo varias versiones de diversas obras, a veces incorporando pequeñas modificaciones. Así, produjo varias copias de *Head No.2*, escultura que él mismo considera su primera obra maestra (Lodder, 2007).

La versión de *Head no.2* realizada en acero corten fue situada en el exterior de la Tate de Londres y rápidamente comenzó a mostrar signos de deterioro, a pesar de que este tipo de material es considerado como bastante estable. Esto fue debido al diseño inadecuado de la obra, que presentaba zonas donde puede acumularse el agua, por lo que la corrosión de la pieza se generalizó. Por ello, Gabo realizó otra versión de la propia escultura en acero inoxidable para que fuese expuesta en el exterior. En este caso, la nueva pieza fue constituida de otro material más resistente a condiciones meteorológicas adversas (Lodder, 2007).

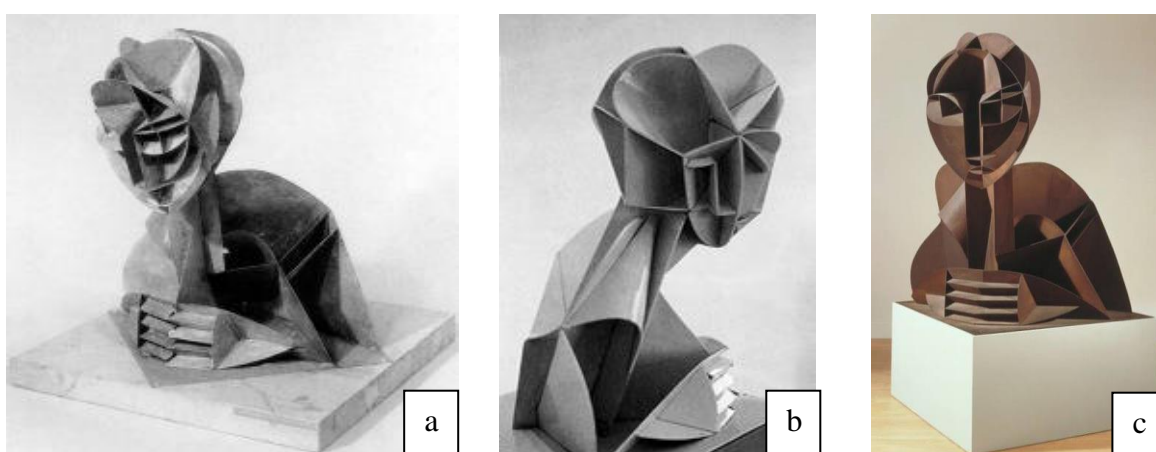


Fig. 224 Escultura *Head n°2* de Naum Gabo realizadas en diferentes materiales: a) 1916, hierro galvanizado, pintado originalmente con ocre amarillo, altura 45 cm. ©Nina Williams; b) 1923, rhodoid, (acetato de celulosa), altura 43 cm. ©Nina Williams; c) 1916, versión ampliada en 1964. ©Nina Williams & Graham Williams.

Henk Peeters⁶⁰, es otro ejemplo de artista que realizó diversas versiones de sus obras para sus clientes (Beerkens, 2007).

Por su parte, Tom Claassen⁶¹ realizó sus primeras obras en caucho natural y a partir de moldes. En respuesta a las cuestiones planteadas por los museos acerca de la durabilidad de alguna de sus obras de látex, añadió instrucciones para rehacerlas paso a paso cada diez años, tiempo en el que el material se deteriora. Este artista declaró además que cualquier persona con habilidades creativas sería perfectamente capaz de producir una nueva versión (Beerkens, 2007).

Existen numerosos ejemplos en los que el propio artista ha autorizado la realización de la copia o bien el mismo ha replicado su obra.

Realmente, en conservación de arte contemporáneo es frecuente que, cuando una obra se deteriora, se sustituyan ciertos elementos de la misma o la propia obra completa por una copia siempre con la autorización del autor, incluso a veces él mismo realiza la réplica o el tratamiento de conservación. En estos casos, se tiene en cuenta que el autor presenta sus derechos morales y puede conservar los de explotación.

En 1923, Lissitzky⁶² realizó una instalación en un pequeño espacio cuadrado que albergó relieves practicados en las paredes, creando así un espacio tridimensional. Sin embargo, al término de la exposición, ninguno de sus elementos constitutivos fueron conservados. En 1965 Jean Leering, director del Van Abbemuseum entre 1964 y 1973, realizó una reconstrucción de la obra con motivo de una Exposición de la obra de Lissitzky, convirtiéndose en parte de la colección del Museo,



Fig. 225 *Prounenraum* de Lissitzky, 1923, reconstrucción de 1971. ©DACS.

⁶⁰ Henk Peeters, 1925-2013, artista alemán.

⁶¹ Tom Claassen, escultor nacido en 1964 en los Países Bajos.

⁶² Lissitzky, pseudónimo de Eleazar Márkovich Lissitzsky, 1890-1941, pintor, arquitecto, diseñador gráfico, fotógrafo, maestro y tipógrafo, es una de las figuras más importantes e influyentes del Constructivismo, la vanguardia rusa de principios del pasado siglo (Alcalá, 2013).

y fue prestada a varias exposiciones en Europa. En 1970, Leering decide hacer una segunda reconstrucción, ya que la obra fue solicitada para ser expuesta en una exposición en París y en la Tate de Londres.

En 1995, la primera reconstrucción de la habitación fue vendida por el Museo Van Abbe mientras que la segunda constituye aún parte de la colección. Es evidente que el interés de Leering en Lissitzky forma parte de la historia. Por otra parte, la copia, además de describir el trabajo perdido del artista ruso, constituye ahora una parte de la historia del coleccionismo (Berndes, 2007).

El artista László Moholy-Nagy⁶³ también ha realizado numerosas copias y réplicas, tanto en su vida profesional estando vivo, como después terceras personas, es decir con la autorización de sus herederos. Generalmente sus obras, al igual que en los anteriores casos, han sufrido la degradación de sus componentes o sus propios materiales compositivos, lo que ha creado en los museos la necesidad de realizar réplicas de sus obras.

En 1965 Leering organizó una exposición que incluía su obra *Licht-Raum Modulator*, perteneciente a la colección del Museo Busch-Reisinger de Cambridge, Massachusetts. Dado que el original, destinado a girar sobre su eje para proyectar luces y sombras en las paredes adyacentes, no funcionaba correctamente, sugirió contar con una réplica. Sin embargo, la viuda de László prefirió restaurar la obra original, a pesar de lo cual la intervención no tuvo éxito y la obra tuvo que ser mostrada estática. Pasados unos años, Leering fue informado de que la viuda accedía a producir dos réplicas⁶⁴. Leering



Fig. 226 *Light Prop for an Electric Stage* de László. ©Hattula Moholy-Nagy / DACS.

⁶³ László Moholy-Nagy, 1895-1946, pintor de origen húngaro. Fue una figura relevante en el arte del s.XX gracias a sus experimentos con la luz y el tiempo, no dejó de experimentar con toda suerte de géneros artísticos, interesándose especialmente por los fenómenos lumínicos que estudió en sus fotogramas y en sus películas (Museo Thyssen- Bornemizsa, 2009).

⁶⁴ La investigación y la producción fue supervisada por la esposa de Otto Piene.

actuó rápidamente y en 1970 fue capaz de comprar una de las réplicas, que fue prestada a numerosas exposiciones en Europa, manteniendo su perfecto funcionamiento. En 1990 necesitó una restauración, dado que el motor no funcionaba correctamente. En 2003, la obra se instaló permanente en las galerías del nuevo edificio de Van Abbemuseum, decidiéndose que no se expusiese al aire libre dada su fragilidad (Berndes, 2007).

En el año 2000 también fue realizada una réplica de su obra *Light Prop* para una muestra organizada por la Tate. La obra ha evolucionado y ha sido modificada desde su creación en numerosas ocasiones y por diversos motivos.

La realización de la réplica fue permitida por su hija y la concurrencia de dos instituciones europeas, Bauhaus Archiv, Berlín, y Van Abbemuseum, Eindhoven, poseedoras de réplicas anteriores de 1970. El museo tiene un contrato firmado con la Tate y con la hija del artista donde se establecen los términos de la adquisición, tales como que la réplica ha de ser objeto de préstamo, siempre que sea posible, a grandes exposiciones. También se indica que la réplica no puede ser considerada obra de arte y que la Tate tiene el derecho de exponer la réplica uno de cada cuatro años (Lye, 2007).



Fig. 227 *Licht-Raum Modulator* de László Moholy-Nagy, 1922/1930, replica 1970. ©Hattula Moholy-Nagy / DACS.

Así, desde los años 70 las publicaciones que llevan en sus títulos las palabras “auténtico”, “autenticidad” y “autenticación” se multiplican por cinco (Lowenthal, 1992, p.184), por lo que conceptos tales como original y auténtico han de ser también definidos, ya que suelen ser confundidos con frecuencia.

6. 1. 1 El concepto y valor de “lo original”

En términos filosóficos, original es aquello referido al nacimiento de una idea como valor, que dará lugar a una obra única y exclusiva. Puede ser además novedosa respecto a una producción artística y no suele estar destinada a reproducirse, lo que no quita que, si llega a ser ampliamente aceptada por la sociedad, sea copiada, reproducida o falsificada. Por lo tanto, podría definirse el concepto de originalidad aplicado a la creación artística como un juicio de valor, que a modo cuantitativo mide el grado de creatividad de las obras. Por auténtico se entiende algo que viene a ser verdadero, bueno y legal, siendo una cualidad referida al carácter propio de la obra artística (Morón, 1998, pp.118 y 119).

En la búsqueda de soluciones de conservación del arte contemporáneo, se llevan a cabo numerosos ejercicios de reconstrucción y realización de réplicas con ayuda del artista o bien de un especialista en el material relevante. También se llevan a cabo con fines educativos y de investigación, dado que sólo rehaciendo una obra se puede entender el alcance total de los procesos de trabajo originales (Beerkens, 2007).

En los últimos años, el factor de la autenticidad, o integridad, que constituye uno de los factores primordiales que confieren su relevancia al bien cultural, ha sido redefinido. Bien es sabido por parte de los profesionales e investigadores que en el caso de cualquier tipo de intervención sobre la obra esta ha de ajustarse al mantenimiento de la autenticidad, que fomente siempre y permita que la mayor parte del material histórico existente sea debidamente conservado. Sin embargo, en conservación de arte contemporáneo, como se ha indicado, muchas veces se reponen partes enteras de las obras o incluso las propias obras teniendo en cuenta los morales y de explotación del autor. Por ello, puede contemplarse la autenticidad como un tema más complejo de lo que en principio pudiera pensarse (Bazeta y Rodríguez López, 2013).

Sebastiano Barassi⁶⁵ (2007), en su artículo *The Modern Cult of Replicas: A Rieglian Analysis of Values in Replication*, indica que Alois Riegl⁶⁶ identificó dos categorías

⁶⁵ Sebastiano Barassi es jefe de colecciones de la Henry Moore Foundation (Arte Informando, 2015).

⁶⁶ Alois Riegl, 1858-1905, es uno de los principales representantes del formalismo en la historia del arte. Fue Conservador del Museo de Artes Decorativas de Viena, publicó obras fundamentales para el desarrollo de la

referentes al valor atribuido al monumento:

a. Valores de memoria, referidos a la satisfacción de las necesidades psicológicas e intelectuales. Estos son:

- El valor dado por la edad o antigüedad del objeto, que promueve la visión del monumento como objeto orgánico que va a sufrir degradación, apreciando pura y visualmente la edad, independientemente de consideraciones históricas o artísticas. Su culto exige no interferir con los procesos naturales de degradación, rechazando de este modo todas las formas de conservación.
- El valor histórico, que considera el monumento como la representación en un momento preciso de la historia de un aspecto particular. El énfasis se centra en el valor documental, aspirando tener el monumento tan cerca como sea posible a su estado original, principalmente a través de la conservación preventiva.
- El valor conmemorativo intencionado, que sólo se aplica a una minoría de los monumentos intencionales. Promueve la conservación del monumento como nuevo, que honre adecuadamente el evento o persona al que fue dedicado, abogando por la restauración y oponiéndose así al valor de la edad.

b. Valores actuales, aquellos que se refieren a la satisfacción de las necesidades prácticas y estéticas e incluyen:

- El valor del uso, referido a la funcionalidad y uso diario. Suele ser incompatible, aunque no siempre, con el valor de la edad.
- El valor artístico, subdividido en: el valor de la novedad, opuesto al valor de la edad. Exige integridad formal y apreciación por la mayoría del público y el valor artístico relativo, que aboga por una apreciación puramente estética del monumento. En todos los casos se invoca la conservación y en ocasiones hasta la restauración a un estado prístino.

Todos estos valores pueden coexistir dentro de la misma obra; sin embargo, hay otros en los cuales éstos pueden entrar en conflicto. Como es difícil equilibrar diversas posturas,

historiografía artística en la que mostró una nueva imagen de asuntos que hasta entonces habían sido ignorados (Casa del Libro, s.f.).

la creación de réplicas puede suponer una posible solución. En su discusión sobre el valor histórico, Riegl señala que éste podría invocar la recreación o la replicación, siempre que el original permanezca intacto preservándose su integridad documental. Afirma a su vez que, con el tiempo, la réplica puede adquirir ese valor histórico, especialmente en aquellos casos en los que el original se ha perdido o desaparecido. No obstante, la reproducción debe mantenerse como ayuda a la investigación, no como sustituto del valor histórico y estético del original.

Las réplicas pueden ser realizadas por el propio artista, un asistente de este, el Estado, un consejo asesor, en ocasiones constituido por amigos del artista, una galería, aficionados, un conservador, un escenógrafo, etc (Curtis, 2007).

Mientras que Riegl menciona la réplica superficialmente, sin discutir otros valores posibles, Barassi, propone que la intención de crear réplicas enfatiza en el valor de su uso, que refleja las tendencias actuales en el pensamiento museológico. Una réplica puede convertirse en un “utilizable” equivalente de un original “inutilizable” para fines de visualización, pero conservando sin embargo el valor documental. Los dos objetos en combinación cubrirían las necesidades que un original en buenas condiciones suele aportar (Barassi, 2007).

Sin embargo, parece razonable que los visitantes de un museo suelen esperar encontrarse con obras de arte originales, aquellos objetos con valores históricos y/o de edad, además, del artístico. Aquí subyace el punto realmente fuerte del museo, especialmente en una sociedad como la actual, en que continúa valorándose fuertemente la historia y la autenticidad, al mismo tiempo que las realidades virtuales se convierten en algo común (Barassi, 2007).

Es también fundamental aclarar que un facsímil puede convertirse en una falsificación si la información que transmite induce a errores sobre el original. Dicha falsedad puede ser técnica o ética. La falsedad técnica supone una infidelidad de registro, obteniéndose como resultado una pieza que no representa fielmente las propiedades del original. En ocasiones, todas las propiedades son imposibles de reproducir, por lo que hay que obviar el problema indicando el nivel de error. Por ejemplo, en numerosas ocasiones el peso de las piezas no representa una propiedad necesaria de reproducir, por lo que esta se obvia. Sin embargo, la falsedad ética supone una intención de engañar. Por ejemplo, se puede indicar que la copia es fiel, aunque no sea tan fiel o, en caso más grave, con la copia

se intenta suplantar el original. Igualmente, en muchos casos puede darse que al observador no se le informe de que está observando un facsímil y no el original (Pereira, 1999a, p.68).

Numerosos casos demuestran que esta indicación es muchas veces obviada, aumentando la desconfianza ya existente ante el empleo de copias y facsímiles. Como ejemplo de mala praxis, se cita la exposición temporal instalada en el Centro Cultural Fernán Gómez de Colón en Madrid desde el 13 de noviembre de 2013 hasta el 18 de mayo de 2014. La muestra reunía el conjunto de más de 150 réplicas a tamaño original en la que podían verse 90 guerreros y numerosos caballos, acompañados de equipamiento de guerra, pertenecientes al ejército de terracota del primer emperador chino. Contaba, además, con una reproducción de la sección del foso 1, en la cual fueron encontradas las piezas originales, todo ello a escala 1:1 (Permuy, 2014). Lamentablemente, ni el folleto de la exposición ni en las publicidades referentes a la misma se especificaba que no se trataba de los originales. De hecho, el nombre de la exposición era *Terracota Army*, dando a entender al visitante que en las salas va a encontrarse con los originales.



Fig. 228 El montaje de *Terracota Army* en el Centro Cultural. ©Isabel Permuy.

Por todo ello, cuando en el museo aparece una copia en lugar de un original, siempre debe reconocerse como tal, indicando con clara visibilidad las palabras “reproducción” o “facsímil”, que dejen claro a todo visitante que no es el original lo que contempla. En caso contrario, tal como ha sido visto, se está atentando contra la Ley de

Protección Intelectual⁶⁷, a la par que se está cometiendo un falso histórico⁶⁸. Es fundamental e imprescindible garantizar que las expectativas y la confianza de los visitantes no son traicionadas, para lo cual debe dejarse clara la naturaleza del objeto. (Barassi, 2007).

La réplica incluso, cuando viene “etiquetada” como tal, puede rápidamente asumir el poder que tiene el original, tal como ya se ha indicado, especialmente en casos en que este ha desaparecido o está tan degradado que no puede ser exhibido (Cooper, 2007).

Por su parte, como en el caso anteriormente citado, la realización de reproducciones es más ampliamente aceptada y valorada en las exposiciones temporales e itinerantes, ya que con el uso del facsímil se evita el robo, deterioro y los posibles accidentes acaecidos sobre el original en caso de que este se preste. Además, las esculturas de gran tamaño y peso pueden presentar importantes dificultades y altísimos costes a la hora de ser transportadas, inconvenientes que desaparecen con la realización de reproducciones. Lo mismo ocurre con los objetos especialmente frágiles, preciosos o únicos; por ejemplo, pueden citarse las osamentas de los homínidos más antiguos, para las que existe un acuerdo internacional de exponer únicamente las reproducciones (Macarrón y González Mozo, 2011, p.45).

Así, gracias a las reproducciones se conservan datos e informaciones que por diversos motivos en el original pueden haber desaparecido. Como ejemplo, cabe destacar la tan conocida escultura de *Atenea Varbakeion* (s. V. a. C.) que constituye una copia romana (200-250) realizada en mármol. La obra original, la *Atenea Pártenos*, fue realizada por Fidias en oro y marfil. Era, por tanto, crisoelefantina. La escultura se perdió completamente no solo por la degradación de sus materiales tales como el marfil, sino también por la desaparición de su valioso oro, que en diversos episodios bélicos fue arrancado de la obra. De este modo, gracias a la conservación de esta copia romana se mantuvo el testimonio de la existencia del original (Macarrón, 2013, p.33).

Ha de recordarse, por tanto, que en el pasado circulaban un sinfín de copias y reinterpretaciones junto con las obras de arte originales. Esta profusión de copias

⁶⁷ Esta será revisada en el capítulo 8.

⁶⁸ Según Cesare Brandi (1977) en el ámbito del patrimonio artístico se considera falso histórico el resultado de cualquier intervención tendente a la restitución del aspecto original de la obra considerándose que busca insertarse en el acto de la creación, substituyendo al propio artista o suplantándolo (citado en González Moreno-Navarro, 2007, p.3).

mezcladas con los originales pudo ser posible debido a la realización de vaciados, grabados, versiones, réplicas y reproducciones de las obras de los grandes maestros, a través de las cuales (sin la existencia de otra vía de comunicación) fluía una actividad de aprendizaje, préstamo y comunicación de cánones y modelos a lo largo del mundo occidental.

Actualmente la mayoría de los grandes museos ofertan una gran cantidad de reproducciones en sus tiendas. Entre ellos, destaca el Louvre, que copia obras no sólo de su propio museo, sino también de otros.

Este museo cuenta con numerosas reproducciones cuyo precio varía según el tamaño y material de reproducción, siendo generalmente lo más económico los tamaños más reducidos y de resina, aunque existe también la posibilidad de adquirir obras en bronce y mayor tamaño. Algunas de estas reproducciones cuentan con un acabado sencillo, en un solo tono, mientras que otras reproducen y replican la apariencia del original (Musée du Louvre, s.f.).



Fig. 229 Algunas de las reproducciones en venta en la tienda del Museo del Louvre: la imagen de la izquierda (a) muestra una de las posibilidades de reproducción de *La Victoria de Samotracia*, en este caso en resina blanca y una medida de 18 cm, que tiene un precio de 95€; la reproducción del centro (b) es la *Hija de Nefertari* y en ella se ha reproducido en resina la apariencia original, mide 20x12x10 cm y cuesta 192€; la última reproducción, a la derecha (c), es *El Gladiador Borghese*, realizada en bronce, mide 38x28x26 cm y tiene un precio de 2320€. ©Musée du Louvre.

También en el British Museum es posible adquirir reproducciones (British Museum, s.f.). La réplica del retrato de mármol de *Antinous* se vende actualmente en resina, producida a partir del molde de una impresión 3D realizada a partir de la

digitalización del original. Este se expone en el museo y puede también ser explorado a partir de Sketchfab en la página del museo. Otra copia que puede adquirirse en el museo es la emblemática *Piedra Rosetta*, a la que en líneas posteriores volverá a hacerse referencia.

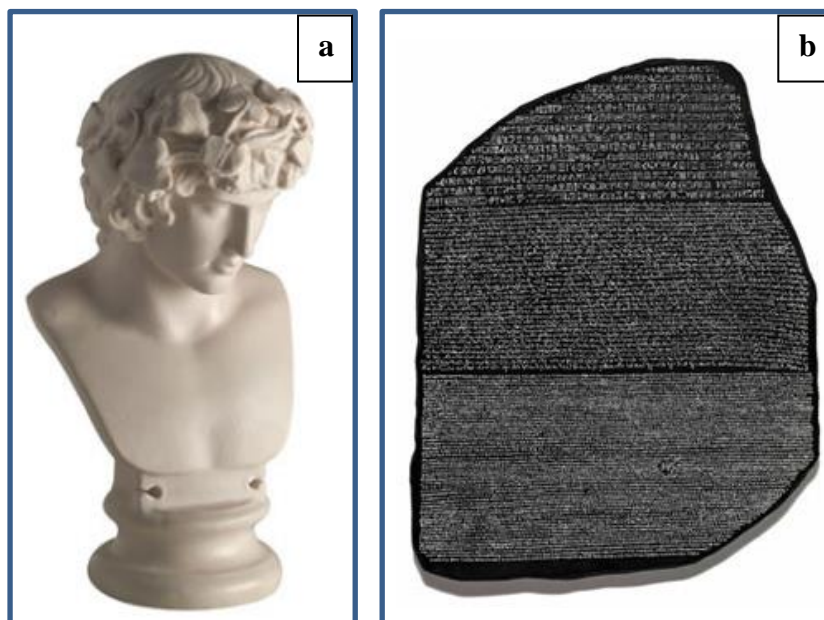


Fig. 230 En la imagen de la izquierda (a) puede verse la réplica de la cabeza de *Antinous*, de 25x13c, que tiene un precio de 250£. Por su parte, a la derecha (b), la *Piedra Rosetta* con unas medidas de 36x19x9,5cm y un precio de 99£. ©British Museum.

Existen numerosos ejemplos de instituciones que venden réplicas de sus obras. Un último ejemplo aportado sobre este tema se refiere a la Fundación del Patrimonio Cultural Prusiano, que produjo en 2015 una edición limitada de 100 copias del busto de *Nefertiti* impresas en 3D, que vendieron por 8.900€ cada uno (Wilder, 2016).

6. 2 Aplicaciones y ejemplos del empleo de reproducciones

A lo largo de la historia, la realización de reproducciones de bienes culturales ha servido para múltiples fines. Quizás los más importantes han sido el de dar a conocer gustos y soluciones plásticas, embellecer estancias particulares y lugares de culto. También se han utilizado con fines de carácter didáctico, utilidad que ha venido dándose hasta la actualidad (Sauras, 2003, p.89).

En relación con la utilidad histórica de las reproducciones y, por su importancia y el papel que jugaron, no pueden dejar de ser mencionadas las *gipsotecas*. Esta palabra

proviene del griego y significa “lugar de los yesos”, siendo el nombre con el que se designan los conjuntos de obras antiguas reproducidas por medio del sistema de vaciado en este material. Las primeras gipsotecas surgen para el estudio del arte, provenientes en gran medida de los vaciados en yeso de obras claves del arte clásico griego e italiano. Estas fueron obtenidas por parte de las monarquías europeas que presentaron interés en poseer estas copias cuando los originales les eran inaccesibles. Después, estas colecciones pasaron a las Academias y Escuelas superiores de Bellas Artes, ejerciendo claramente una función didáctica puesto que servían como modelo de dibujo y escultura para los estudiantes. Así, es en el s. XVIII cuando se crean las gipsotecas más importantes de Europa (Sainz, 2012).

En España, desde sus orígenes en 1752, la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando ha mantenido una extensa galería de esculturas vaciadas en yeso que fueron utilizadas para la enseñanza de los alumnos. Tal como dictaban las pautas europeas, Juan Domingo Olivieri elaboró una lista de las principales obras que deberían adquirirse en Roma. Buscaba conseguir vaciados del Vaticano y del Museo Capitolino. Finalmente, se hizo con una lista de las esculturas de los principales palacios y colecciones de Roma. Las colecciones de Cristina de Suecia y del marqués del Carpio, adquiridas unos años antes por Felipe V e Isabel de Farnesio, se encontraban más a mano, por lo que llegaron a la Academia de San Fernando el *Fauno del cabrito* y el *Grupo de San Ildefonso*, las dos obras maestras de la colección real del momento. Al mismo tiempo, los profesores de la academia consiguieron que el rey les cediese los vaciados de yeso traídos por Velázquez de Italia hacía casi un siglo. Así fueron incorporados a la colección obras como el *Hércules Farnese* y la *Flora Farnese*, entre otras (Real Academia de Bellas Artes de San Fernando, s.f.).



Fig. 231 Imagen de diferentes piezas del Museo. ©Real Academia de Bellas Artes de San Fernando.

A pesar de que las mayores colecciones de escayolas se encuentran en Europa, fuera del continente también pueden encontrarse gipsotecas.

Un museo que cuenta con una importante colección de escayolas es el Metropolitan Museum of Art de Nueva York. La colección y exposición de modelos de yeso se consideró esencial por parte de los museos y las instituciones educativas en la segunda mitad del s. XIX. Estos modelos permitían el acceso público a las esculturas de Europa Occidental desde el otro lado del mundo. De este modo, estas reproducciones no fueron estigmatizadas sino muy valoradas, puesto que los yesos eran considerados un excelente medio de estudio. Numerosas generaciones de estudiantes, el público en general, historiadores de arte y artistas aprovecharon estas colecciones en un momento en que viajar hasta Europa para ver los originales era realmente complicado. La Constitución del Museo, documento escrito en 1870, tenía como objetivo principal la formación de "una colección más o menos completa de objetos ilustrativos de la Historia del Arte desde sus primeros orígenes hasta la actualidad". Por ello, una colección de modelos de yeso fue considerada como el camino más razonable para alcanzar el objetivo en el menor tiempo posible. La colección comenzó a forjarse en 1883 hasta 1895 y en 1908 se publicó un catálogo que contaba con 2.607 obras. Durante cerca de cuarenta años la institución permaneció sin cambios esenciales. A principios de los años cincuenta, casi todos los modelos habían sido trasladados a un área de almacenamiento en Manhattan y en 1985 la colección fue transferida a un almacén en el Bronx. Desde entonces, gracias a un programa de préstamos a largo plazo y de donaciones, estos yesos han sido prestados o entregados a universidades, escuelas de arte y museos, donde se están restaurando y de nuevo ofrecen la oportunidad de estudiar y disfrutar de las grandes obras del arte (Milleker, s.f.).

Hoy en día, la reproducción de objetos patrimoniales tiene numerosas utilidades en el ámbito de la conservación, aunque, como se ha comentado, la realización de un facsímil no está exenta de polémica ya que puede constituir un atentado a la autenticidad del arte o contravenir a los derechos de Propiedad Intelectual.

A continuación, se mencionan algunos de los ejemplos más frecuentes de usos del facsímil (Santos, 2017). La realización de estas reproducciones permite:

a) Exponer la reproducción mientras el bien cultural original necesita un cambio de ubicación por diversas causas como la realización de alguna intervención, proceso de restauración o de estudio.

b) La conservación del original en su lugar habitual de exhibición cuando se realiza un préstamo a otra institución, de modo que el original no sea el prestado, sino su facsímil. De este modo, se evita que las obras sufran daños, entre otros motivos, por la manipulación durante sus desplazamientos o robos.

c) Una mejor conservación de las obras al no exponer el original en un ambiente adverso, de modo que se guarda o preserva en una zona climatizada.

d) Dar a conocer y difundir las obras, muchas de ellas inaccesibles para el público, ya sea por problemas de conservación o de privacidad.

e) La restitución, en el campo de la restauración, de partes originales que se han de guardar separadas o bien se han perdido.

f) Garantizar el testimonio histórico material de las piezas en casos de contingencias como robos, deterioros o desaparición de alguna de sus partes.

g) La repatriación, al menos en forma de facsímil, de la obra, en casos en los que se presentan conflictos entre instituciones y países por poseer o exponer el original.

h) Reagrupar y reconstruir obras constituidas por conjuntos u objetos diversos, que se encuentran dispersas en diferentes museos y lugares, de modo que vuelvan a presentarse conjuntamente.

Teniendo en cuenta estas premisas, en el presente capítulo se aclararán las numerosas aplicaciones que dentro del ámbito de conservación y restauración de bienes culturales presenta la utilización de facsímiles. Esta revisión incluirá los aspectos técnicos que implican su realización y los conceptos éticos que derivan de la misma. La investigación desarrollada busca, por tanto, conocer y realizar un análisis del papel de las reproducciones y valorar si la realización de éstos es justificable, contemplando también los métodos empleados para su producción. Todo ello se realiza con el fin de que, por otra parte, se valoren las posibilidades de las tecnologías 3D que permiten precisamente la realización de copias cada vez más fidedignas.

A continuación, se destacan numerosos ejemplos para las anteriormente citadas utilidades del facsímil.

6. 2. 1 Exposición de la reproducción mientras el bien cultural original necesita un cambio de ubicación

Respecto a la sustitución de un original por su reproducción mientras el primero se restaura, puede hacerse referencia a la actuación sobre el *Giraldillo*. Entre 1999 y 2005, el Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico (IAPH) se encargó de realizar una investigación y posterior intervención de la escultura de bronce denominada el *Coloso de la Fe Victoriosa*, conocida popularmente como *Giraldillo*, que finalizó con su reposición sobre la torre de la *Giralda* en julio del año 2005. Como es bien sabido, esta escultura de bronce fue realizada en el s. XVI y corona la *Giralda*, antiguo alminar musulmán convertido en la torre de la Catedral durante el Renacimiento. Durante la restauración de la pieza, se colocó en su lugar una reproducción realizada en bronce por Pepe Antonio Márquez.

En 2005 se reubica de nuevo el *Giraldillo* original en su lugar de origen y la reproducción se expone actualmente a la contemplación de todos los viandantes ante la Puerta de San Cristóbal de la catedral. El trabajo realizado es reconocido en el año 2006 con el Premio Nacional de Restauración y Conservación de Bienes Culturales (Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, s.f., p.25).



Fig. 232 El *Giraldillo* en el Taller de restauración de metales del IAPH donde aparece Ana Bouzas, restauradora del IAPH. ©IAPH / José Manuel Santos Madrid.

6. 2. 2 Conservación del original en su lugar habitual de exhibición cuando se realiza un préstamo a otra institución

Como se ha indicado, la reproducción puede servir para conservar el original en su emplazamiento habitual de exposición mientras se presta la copia puesto que existen piezas que únicamente son contempladas en el emplazamiento en que se exponen habitualmente. Se trata de piezas únicas o especialmente emblemáticas que los museos no desean prestar a otras instituciones. Como ejemplo, puede hacerse referencia la *Piedra Rosetta*, pieza especialmente emblemática y visitada del Museo Británico. Desde su descubrimiento en 1799 por militares franceses fue destinada a ser expuesta en París; sin embargo, ha sido foco de numerosas rivalidades nacionalistas: tras la derrota de las tropas napoleónicas en Egipto por parte de los ingleses, éstos se la llevaron como botín de guerra a Londres. Los franceses por su parte, además de descubrir la valiosa pieza, contaron con las investigaciones de Jean-François Champollion, quien finalmente descifró los jeroglíficos egipcios gracias a la piedra. A las disputas de estos dos países europeos, se suman, desde hace años, las demandas del gobierno egipcio para que la piedra retorne al país (National Geographic España, 2013).

En este caso, el préstamo de la reproducción permite el mantenimiento de la obra en su lugar de origen, a la vez que favorece su difusión.

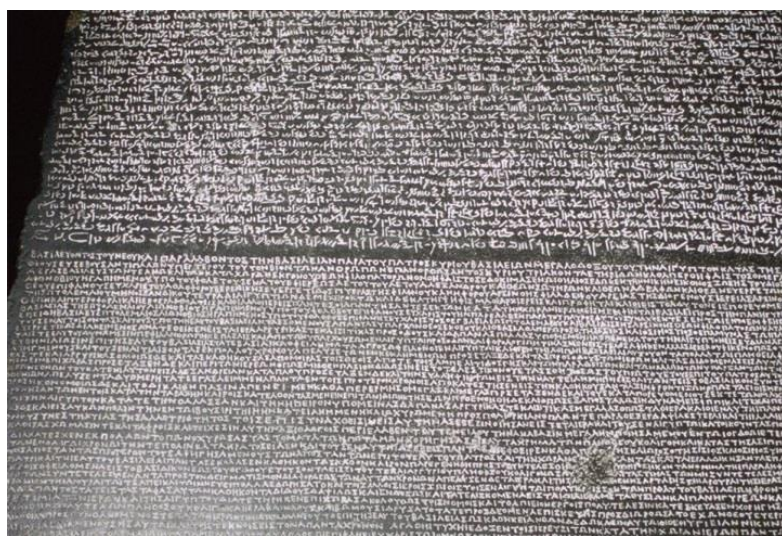


Fig. 233 Detalle de la Piedra Rosetta. ©CM DIXON / HERITAGE / GTRES.

6. 2. 3 Conservación adecuada de las obras guardándolas y/o preservándolas en una zona climatizada

Existen numerosos casos pioneros y realmente novedosos en lo que a tecnología respecta, que constituyen ejemplos y actuaciones claves para esta aplicación: preservar el original o cerrar el acceso al público por cuestiones de conservación preventiva implantando una reproducción.

La *Cueva de Lascaux*, en Montignac, Francia, fue cerrada en 1963. Esta fue descubierta en 1940 por 4 adolescentes que entraron en ella con una lámpara, y descubrieron las hoy mundialmente conocidas pinturas del *Cro-Magnon*. Tras la gran guerra, *Lascaux* fue abierta al público hasta su cierre. Actualmente, la cueva original está cerrada para preservar este patrimonio, que forma parte de los bienes declarados Patrimonio Mundial de la Humanidad por la UNESCO desde 1979 (Laxcaus-Dordogne, s.f. b).

La cueva mantuvo su patrimonio prácticamente inalterado durante unos 18.000 años hasta que el millón de visitantes que pasaron por ella en los 15 años anteriores al cierre, degradaran los restos. Unos años después del cierre, se puso en marcha el proyecto *Lascaux II*, una reproducción facsímil de la *Sala de los toros* y del divertículo, que fue abierta a los visitantes en 1983, a apenas 200 metros de donde se encuentra la original. En 2012 recibió 250.000 visitantes al año (Carantoña, 2012). La más alta tecnológica del momento y el rigor científico permitieron recrear la atmósfera de la cavidad original. Posteriormente, se organizó *Lascaux III*, constituyendo una exposición itinerante internacional que reunía las más altas tecnologías para conseguir una interactiva visita inolvidable: simuladores de presencia humana, inmersión virtual 3D en la Sala de los Toros, gafas activas para ver a copistas trabajando (Laxcaus-Dordogne, s.f. b) ... Después de pasar por Burdeos, Chicago, Houston, Montreal, Bruselas, París y Génova (Laxcaus, s.f. b), la exposición internacional de *Lascaux III* fue exhibida en Gwangmyeong, Corea del Sur, con motivo del 130 aniversario en 2016 del comienzo de las relaciones diplomáticas entre Corea y Francia. Tras pasar por Corea, se expondrá en Japón a partir de octubre de 2016 (The Dong-A Ilbo, 2015).

Ahora se trabaja en la realización de una réplica completa de la gruta original, que será conocida como *Lascaux IV*, cuyos trabajos empezaron en octubre de 2014. Esta tenía como objetivo, según palabras del director artístico del taller de facsímiles del Périgord⁶⁹, reproducir a la perfección la cueva, de modo que el visitante sintiese la misma emoción que si del original se tratase. Para ello se emplearon escáneres 3D y se tomaron fotografías del original. Todo el material obtenido se mostró con proyectores de última tecnología y de altísima calidad, que permitieron reflejar la imagen exacta del original y que los artistas pintasen así lo proyectado. Además de la cualificación de los profesionales y la atenta supervisión del director artístico del proyecto, se contó con directores divididos por sección y un colegio de expertos que acudieron a validar las actividades (Piña, 2015).

Con este trabajo Francia se estableció como referente en reproducción de arte rupestre, dado que fue la primera vez que se reprodujo una superficie decorada tan extensa, en este caso 900m² de pinturas del Paleolítico, que incluía todos los detalles geológicos (Piña, 2015).



Fig. 234 Producción del facsímil en el taller de Francia. ©Maxime Ferrier.

Los visitantes entrarán en la cueva en grupos de 30 personas y, en temporada alta, acompañados por un guía, mientras que en temporada baja será posible utilizar una antorcha como guía. Al visitante se le entregará un cuadernillo con un mínimo de información y esta podrá ser ampliada dentro de la cueva (Lascaux, s.f. a). La apertura de la reproducción está prevista para el 15 de diciembre de 2016.

Para su realización, se precisó del dominio de la tecnología más avanzada. Una vez se establecieron las dimensiones obtenidas por medio del escaneado, se cortaron digitalmente matrices en bloques de poliestireno, donde se reprodujo la textura del muro.

⁶⁹ Taller que emplea a unos 30 artistas y técnicos de sectores. La empresa se ha encargado de la realización de las réplicas desde *Lascaux II*.

Entonces, se realizó el modelado con elastómeros y carcasa de resina. Una vez la estructura de metal que soportaba el conjunto estaba lista y producida con precisión milimétrica, se vació el molde con la resina en combinación con una carga de piedra pulverizada, técnica patentada por la empresa AFSP, que reprodujo el muro fielmente, donde la pátina de color y las pinturas fueron aplicadas posteriormente (Afsp, 2016).

La *Neo Cueva de Altamira* constituye otro ejemplo de realización de facsímil con fines de conservación preventiva. La *Cueva de Altamira* fue descubierta en 1879 por Marcelino Sanz de Sautuola, quien atribuyó el arte rupestre a la época paleolítica. Observando la importancia que tenían las pinturas allí conservadas, instaló una puerta con el fin de impedir acciones irresponsables sobre ellas y el Ayuntamiento estableció que las visitas debían realizarse con un guía municipal. Desafortunadamente, las instancias científicas tacharon de fraude el descubrimiento y su aceptación se produjo ya en 1902, tras el descubrimiento de otras cuevas con arte rupestre en Francia, cuando Sanz de Sautuola ya había fallecido. Según las últimas investigaciones, se habla de un arte realizado con una técnica simple pero eficaz: agua, ocre y carbón aplicados sobre la roca, por lo que su fragilidad es extrema, y su conservación a lo largo de más de 35.000 años se debe a las condiciones favorables y particularmente estables que se dan en el interior de la cueva.

Sin embargo, desde comienzos del siglo XX, el turismo comenzó a escoger la provincia de Santander como destino favorito, entre otros motivos, porque era el lugar que los reyes habían escogido para su residencia de verano. Por ello, en los años veinte se alteró la arquitectura cavernaria, se construyeron caminos y muros en la cueva y se modificó su microclima interior. Además, se instaló una iluminación artificial muy agresiva para las pinturas. A partir de los años cincuenta, Santillana del Mar y la cueva se convirtieron en uno de los destinos más visitados. De este modo, en 1955 comenzaron a emitirse los primeros informes alertando sobre el peligro que la cueva sufría. Pero no se tomaron medidas, prueba de lo cual es que el lugar recibió 177.000 visitantes en 1973, año que ostenta el récord de visitas. Se realizaron entonces nuevas modificaciones para condicionar aún más el entorno y el interior de la cueva. El aumento del número de personas que diariamente visitaban la cueva conllevó que premisas fundamentales para su conservación cambiasen, puesto que no solo desaparecían las condiciones favorables, sino

que además se hacían fuertemente inestables. Por ello, las pinturas estuvieron en peligro de desaparecer (Fatás, 2009, pp.186 y 187; Lasheras, 2008, p.206).

Surgió entonces la idea de realizar una réplica. Ya en 1924, año en que fue inaugurada como museo, se contó con la posibilidad de perder la obra, dada la masiva presencia de visitantes, que ponían en riesgo la conservación de las pinturas. Finalmente, tal como había sido predicho, la cueva se cerró en 1977. Por ello, en 1976 se realizó una primera copia de las pinturas rupestres de la cueva, constituyendo el primer uso (anterior a *Lascaux*) de una reproducción más o menos exacta empleada como medida de conservación preventiva. La primera materialización de esa idea se produjo en Alemania, para el Museo Alemán de la Ciencia y la Técnica de Munich. Otra réplica igual se instaló en los jardines del Museo Arqueológico Nacional y, finalmente, una nueva copia del techo se realizó para Shima, en Japón. Durante los años ochenta fueron dos los proyectos para instalar una réplica en el propio entorno de la cueva de Altamira, buscando de este modo ofrecer una alternativa a su visita, aunque no se realizaron por no resolver todos los problemas de conservación y accesibilidad (Museo Nacional y Centro de Investigación de Altamira, 2004). En 1982, la cueva se reabrió y aceptó un número de 8.000 visitantes al año, manteniéndose el régimen de visitas hasta el año 2002, en el que se decide un nuevo cierre y renovar así el estado de conservación, que sería mantenido sin visitas que lo alterasen (Lasheras, 2008, p.207). Después de años de negociación y discusión política, en los que la cueva se mantuvo cerrada al público general, un museo fue inaugurado junto al emplazamiento original. Para ello, se realizó la conocida *Neocueva de Altamira*, de la cual cabe destacar la aplicación de la tecnología más reciente del momento en la construcción de todo el complejo: técnicas de planimetría más precisas de lo que hasta la fecha se conocían y sistemas de construcción que produjeron 100 veces menos vibraciones de las permitidas por la Ley, con el objetivo de no afectar al original (Agencias, 2001). Además, es importante mencionar también el éxito con el que el museo ha contado, ya que desde su apertura hace 12 años, ha recibido una media anual de 250.000 visitantes que han podido hacerse una idea bastante ajustada de lo que se atesora en la gruta original (Fernández Santos, 2014).

Esta *Neocueva* reproduce íntegramente el área del vestíbulo de la cueva, zona de habitación en época paleolítica, y la contigua, correspondiente al techo de los polícromos, no con el aspecto que presenta en la actualidad, sino tal como era en el pasado (hace unos 13.000 años un desplome

modificó el aspecto del tramo inicial de la cueva y la bloqueó hasta su descubrimiento; hubo más desplomes poco después de su descubrimiento en 1924 y 1930, por lo que se construyeron muros que impidieran que las pinturas de los techos se dañasen) (Lasheras, 2004, p.22; Lasheras, p.28). Para comprender como era la cueva, se realizaron estudios geológicos, arqueológicos e historiográficos. Para su producción se emplearon metodologías topográficas e instrumentales de última generación en el momento. Se desarrolló un software específico que midiera directa y automatizadamente unos 600.000 puntos que definirían la geometría de la cueva. Con el modelo 3D de los 1.000 m², se suprimieron muros y obras realizadas en el s. XX y los derrumbes posteriores al paleolítico fueron repuestos. El techo de los polícromos fue realizado con un levantamiento fotogramétrico de 51 negativos de 13x18 cm con 70 puntos de apoyo. A partir de la documentación pudo generarse la reproducción con una fresadora de alta precisión y después se realizó el molde, vaciado con una mezcla de resinas y polvo de roca caliza (Lasheras, 2008, pp.209 y 210).

Las pinturas no podían ser reproducidas con ninguna técnica en ese momento pero el trabajo fue realizado con la máxima y absoluta fidelidad al original, empleando para ello los mismos materiales originales⁷⁰ (Lasheras, 2008, p.210).

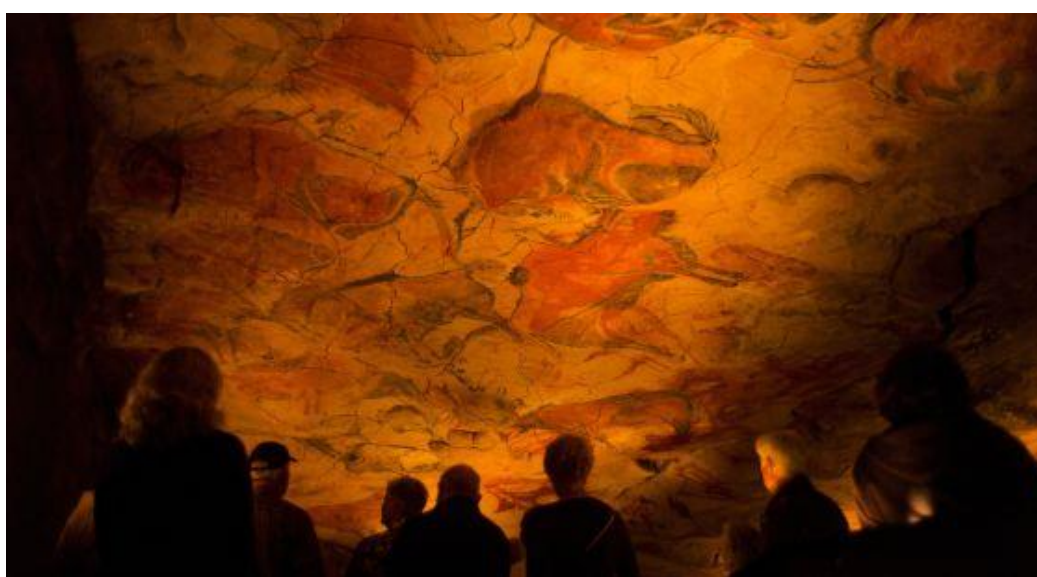


Fig. 235 Turistas observando la réplica de la *Cueva de Altamira*. ©Tino Soriano.

or su parte, en enero de 2014 el Patronato del Museo de Altamira aprobó la segunda fase del Programa de Investigación para la Conservación preventiva y régimen de acceso de la

⁷⁰ Matilde Muzquiz y Pedro Saura (2002, p.222), autores de las reproducciones de las pinturas, explican que:

Estudiamos la luz con la que posiblemente se iluminó, la elección de la superficie en la que construyó cada una de las figuras, la postura física que adoptó para realizar cada uno de los bisontes, la técnica y procedimientos empleados, el orden de ejecución de los mismos, los materiales elegidos, la dirección del trazado del carbón, así como su ritmo y su carácter.

cueva de Altamira, cuyo objetivo era analizar el impacto que la presencia humana podía ocasionar sobre la conservación de este bien Patrimonio Mundial. Se iniciaron entonces visitas de carácter experimental, una a la semana, entre los meses de enero y agosto de 2014, en las que participaban seis personas (cinco visitantes y un guía). La visita tenía una durabilidad de 37 min y se sometía a los visitantes a los protocolos de accesibilidad establecidos tras informarles de las limitaciones de acceso que presentaba la cueva. Los visitantes entraban con monos desechables, gorro, guantes, mascarillas, así como con un calzado especial o lavado de suelas, todo ello facilitado por el museo. La temperatura del aire y de la roca, la humedad relativa del aire, contaminación microbiológica, las aguas de infiltración, el radón y el CO₂, entre otros, eran controlados durante la visita. Los resultados de esta fase permitieron comprobar que las visitas debían mantenerse durante un año para poder obtener más datos (Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, 2014). Se iniciaron así las visitas del público a la cueva, tras 12 años de cierre en los que solo científicos encargados de desarrollar las investigaciones habían accedido a ella.

El Patronato del Museo Nacional y Centro de Investigación de Altamira decidió en marzo de 2015 mantener el régimen de acceso controlado y limitado a la cueva. La gestión de las visitas sigue el procedimiento de selección aleatoria de los cinco participantes entre las personas que se encuentren visitando el museo el día de la visita. Actualmente la visita se realiza los viernes y existe un límite mínimo de edad de 16 años para acceder a ella (Museo de Altamira, 2015).

Por su parte, la réplica virtual de las *Cuevas de Santimamiñe* en Kortezubi, Bizkaia, ilustra otro ejemplo que sigue la línea de los anteriormente citados. La cueva constituye el yacimiento arqueológico más importante de Bizkaia⁷¹ y fue descubierta casualmente en 1916 por un grupo de jóvenes, siendo un año después verificada por H. Breuil, quien localizó además figuras nuevas, contándose en total casi medio centenar de pinturas al carbón y/o incisas, con una datación aproximada entre 14.500 y 12.000 años

Tras su descubrimiento, la Diputación de Bizkaia se hizo cargo del hallazgo y cerró la cueva para evitar destrozos en el conjunto. Las primeras excavaciones se desarrollaron

⁷¹ Cuenta con restos conservados de asentamientos humanos con más de 14.000 años y casi medio centenar de pinturas rupestres con representaciones de diferentes animales, como bisontes, caballos, ciervos, cabras y osos pardos. La cueva posee, además, numerosas formaciones de estalactitas y estalagmitas de gran belleza.

principalmente entre 1918 y 1962 (Cueva de Santimamiñe, s.f.). Después de acondicionar la cueva convenientemente, fue habilitada para el acceso del público: se instaló una completa red de alumbrado eléctrico y un complejo de rampas y escaleras metálicas. Los principales visitantes, además de los interesados en la cueva, eran estudiantes de todas las edades. La cueva se encuentra en el entorno natural de Urdaibai, declarado Reserva de la Biosfera por la UNESCO y en 2008 fue declarada Patrimonio de la Humanidad (Madarieta, 2013, p.330).

Actualmente se encuentra cerrada al público, pero es posible contemplar la riqueza de su interior a través de los recorridos virtuales en 3D y los visitantes también pueden acceder al yacimiento arqueológico situado en la entrada de la cueva.

Desde 2004 hasta la actualidad, un equipo multidisciplinar trabaja en una nueva fase de excavación dentro de un proyecto de revalorización promovido por la Diputación Foral de Bizkaia (Diputación Foral de Bizkaia, 2008).

Se estima que un millón de personas visitó la cueva durante su apertura, siendo partícipes del magnífico conjunto de pinturas rupestres allí conservadas. Sin embargo, como única medida de protección se colocó una valla en la entrada de la cueva, impidiendo el paso en los horarios en los que no podía ser visitada, y las figuras, por tanto, fueron deteriorándose, perdiendo notablemente su nitidez inicial. Tal llegó a ser la degradación, que las figuras corrían el riesgo de desaparecer, por lo que la alarma saltó a la institución foral de Bizkaia. En 2006, los diversos estudios realizados por el Servicio de Patrimonio de la Diputación confirmaron que las pinturas corrían un grave peligro de desaparición y se tomó la decisión de proceder al cierre cautelar de las cuevas, mientras los estudios finalizasen. Cuando esto ocurrió, en noviembre del 2006, el cierre se convirtió en una decisión permanente y se retiraron gran parte del complejo de luces, escaleras y otras estructuras metálicas. Como en los casos anteriores, era preciso encontrar una solución, pero, a diferencia de éstos, en los que se ha realizado un facsímil físico, en este caso el elevado esfuerzo económico no podía asumirse, por lo que se optó por recrear la cueva mediante una réplica virtual. Esta permite la posibilidad de realizar una visita sin la presencia física del visitante en la misma⁷² (Madarieta, 2013, p.334).

⁷² El proyecto recrea visitas virtuales en tiempo real dentro de la ermita de San Mamés, a cien metros de la entrada de la cueva y actualmente sin culto regular. Por medio de una completa instalación de dispositivos visuales y sonoros, en una gran pantalla estereoscópica, el visitante se coloca unas gafas y recorre una cueva virtual exacta a la original. La visita se lleva a cabo con la participación de un guía que interactúa en ella

Las sensaciones experimentadas por la visualización y la interactividad del recorrido y el sonido son impresionantes. El programa que muestra la visita permite que el itinerario no sea único ni estático. Por ello, el espectador realiza el itinerario caminando a la velocidad deseada, observando los detalles que le apetecen y decidiendo el camino a



Fig. 236 Interior del museo. ©Asier Madarieta.

seguir en cada momento, por lo que siente en gran medida que está visitando la cueva físicamente. Además, la aplicación incluye numerosa información accesoria sobre la cueva y, más especialmente, sobre las pinturas (Madarieta, 2013, pp.332 y 333).

Por su parte, los proyectos que suponen el escaneado en alta resolución y producción de facsímiles de las tumbas más amenazadas del *Valle de los Reyes* de *Luxor* son casos que tienen especial importancia y, por ello, su mención es fundamental. Servirán para poner de manifiesto los frutos que, en el ámbito de la conservación, produce la colaboración interdisciplinar entre ingenieros, restauradores e historiadores. Entre los diversos casos que pueden ser citados, a continuación, se hará referencia a la reproducción de la *tumba de Tutankamón*. Este faraón pertenece a la XVIII dinastía de Egipto (r. 1328-1319 a. C.) y su tumba se sitúa en el *Valle de los Reyes*⁷³, en concreto en la ribera

dirigiendo al grupo para mostrar en cada sala todos los elementos de interés. Primeramente, se recrearon los 450 m de la cueva, repartidos en 10 salas conectadas con mínimo margen de error de 5 cm a lo largo de todo el recorrido. Para ello, se realizaron 200 barridos con scanner láser 3D en el espacio original, 6.000 millones de puntos de información de la cueva, más de 1500 fotografías digitales de alta definición. Además, se emplearon mapas geomorfológicos, el inventariado con la información de la cueva, calcos de todo el arte rupestre, sonidos ambientales obtenidos *in situ* y videos. La visita posibilita recorrer la cueva completa, donde se puede además acceder de forma interactiva a la información referente a cada punto de interés (Madarieta, 2013, p.332).

⁷³ La tumba fue parte de la necrópolis de la antigua Tebas durante el Imperio Nuevo, 1548-1086 a. C, y fue descubierta en noviembre de 1922 por el arqueólogo británico Howard Carter. Es conocida también como KV 62, acrónimo que utilizan los egiptólogos, que significa Valle de los Reyes, del inglés Kings' Valley, para designar a las tumbas allí ubicadas. El sistema fue creado por John Gardner Wilkinson en 1821, quien numeró las 21 tumbas entonces conocidas de acuerdo a su ubicación. El resto de las que se han descubierto

occidental del río Nilo, en la ciudad moderna de *Luxor*, Egipto (Theban Mapping Project, 2002).

Aunque KV 62 es una de las más pequeñas de las tumbas reales del *Valle de los Reyes*, se encontraron en su interior espectaculares tesoros y numerosos objetos del faraón, lo que la convirtió en una de las más populares (Getty, 2013). El Griffith Institute de Oxford cuenta con un archivo de más de 2000 fotografías que muestran detalladamente escenas del descubrimiento, así como cada objeto hallado (The Griffith Institute, 2005).

Desde 1922, Egipto y sus tumbas han sido visitados por millones de personas, especialmente en los años 60. En 1972, la exposición *Tesoros de Tutankamón*, en Londres, tuvo un registro de 1.650.000 personas. Investigaciones realizadas por el Instituto de Conservación Getty⁷⁴, permitieron apreciar que el daño causado por los visitantes era más crítico del que se suponía (Byrnes, 2013). Por ello, el instituto hizo público, a través de Zahi Hawass, entonces Secretario General del Consejo Supremo de Antigüedades de Egipto, un informe en el que establecieron las principales causas de degradación de las tumbas. En él se situó al turismo como la amenaza más visible para los sitios antiguos de Egipto ya que, efectivamente, la *tumba de Tutankamón* era visitada por hasta 1.000 personas al día y el efecto de los cambios de temperatura, los niveles de humedad y el polvo constituían un grave problema que se traducían en graves daños para las pinturas murales, cubiertas completamente de hongos pardos. Además, otros factores preocupaban especialmente, como el crecimiento urbano que conlleva un aumento del tráfico vehicular alrededor de los sitios arqueológicos, así como el hecho de que los daños se vean agravados por las inadecuadas intervenciones de restauración anteriores y las generalizadas negligencias practicadas en las excavaciones (Hawass, 2008).

La crítica situación se generalizaba en las tumbas, en concreto, también en la de *Tutmosis III*. Las paredes se encontraban cubiertas de eflorescencias, causadas por la acumulación de la humedad en los muros, que provoca la cristalización de las sales existentes y consecuentes grietas, lo que se traduce en un deterioro masivo (BBC, 2013). La situación más grave se daba en las *tumbas de Nefertari y Seti I*, en las cuales se observa un grave deterioro tanto en la superficie como debajo de la misma por causa de la

desde entonces, llevan asignado un número KV secuencial en el orden de su descubrimiento. John Gardiner Wilkinson estableció en 1827 el sistema de numeración como parte de su preparación de un mapa de Tebas; pintó, además, los números del 1 al 21 en las entradas de las tumbas (Theban Mapping Project, 2002).

⁷⁴ El instituto trabaja para avanzar en las prácticas de conservación del Patrimonio Cultural Mundial a través de la investigación científica, la educación y la formación.

humedad. De este modo, se estima que la cristalización de las sales provocará, en un período de tiempo corto, el desprendimiento íntegro de las capas (de hecho, ya ha ocurrido en *Seti I* en numerosas secciones). En el caso de *Nefertari* el problema era muy complejo antes de la limpieza a la que fue sometida, agravándose aún más por la aplicación de Paraloid B72 como consolidante para estabilizar la roca pintada. Su uso ha sellado la superficie e impide la transpiración natural del muro, lo que acumula aún más la humedad, aumentando las eflorescencias (Lowe, 2004, p.139).

La UNESCO reconoció el problema ya en los años 90, estimándose que, sin una actuación urgente, el patrimonio de Egipto desaparecería totalmente en 100 años; aun así, debido a la importancia del turismo para la economía del país, que constituye su principal fuente de ingresos, era complicado establecer una opción que conjugara protección y número de visitantes.

Tras la realización de los informes previos, de nuevo se plantea la urgencia de crear un turismo cultural sostenible en la *Necrópolis de Tebas*. Así, se decide como única solución posible, que no afecte ni al turismo ni a la conservación de las tumbas, llevar a cabo un ambicioso estudio 3D a color y en alta resolución de las que peor estado de conservación muestran. El acuerdo alcanzado incluye el registro digital 3D y la realización de fotografía en color (con luces frías de bajo nivel) de todas las superficies decoradas dentro de las *tumbas de Seti I, Nefertari y Tutankamón*⁷⁵ (Factum Foundation, s.f. f).

De este modo, Zahi Hawass anunciaba entonces la decisión de cerrar para siempre la *tumba de Tutankamón*, recordando que *Seti I* se encontraba cerrada al público desde finales de 1980 y *Nefertari* solo podía ser visitada con cita previa especial con el objetivo de desviar el turismo hacia facsímiles que se instalarían en las cercanías. Hawass ya había comentado en numerosas ocasiones que no había otra manera de preservar para la posteridad las tumbas reales si estas no habían sido cerradas. Eduard Porta⁷⁶, director de la restauración de la *tumba de Nefertari* llevada a cabo por la Fundación Getty en 1991, reafirmó que *Tutankamón* no podía tener 10 millones de visitantes al año; y destacó su firme convicción de que más tumbas deberían cerrarse ante la ausencia de otra solución,

⁷⁵ A través de una licencia es posible acceder desde internet a todos los datos obtenidos durante la documentación de la tumba, registrada en el Centro de Documentación del Consejo Supremo de Antigüedades. Esta documentación se utiliza como recurso central para controlar el grave deterioro en las tumbas.

⁷⁶ Consultor de la Unesco en Museología y Conservación, coordinador del programa de los museos egipcios y del grupo de trabajo de Arte Rupestre del ICOM.

recordando que con la apertura de la *tumba de Nefertari* en 1992 tras su restauración, rápidamente hubo que cerrarla de nuevo dados los daños que se habían producido. Porta explicó cómo en una tumba la humedad relativa debería permanecer a unos valores del 30% y a causa de los visitantes ascendía hasta el 90%, añadiéndose, además, las temperaturas de más de 40°C de mayo a noviembre, lo que incrementa la actividad de hongos y microorganismos (Jacinto, 2011).

Así, los facsímiles de las tumbas forman parte del proyecto que surge como iniciativa del SCA (Supreme Council of Antiquities)⁷⁷ para la conservación de las tumbas del *Valle de los Reyes* y es dirigida por la Universidad de Basilea; a su vez, lo organizan de manera conjunta la fundación suiza The Friends of the Royal Tombs of Egypt⁷⁸ y Factum



Fig. 237 Fragmento del facsímil de *Seti I*. ©Factum Arte.

Arte, encargada de todo el trabajo de registro y escaneado en alta resolución, además de la elaboración de los facsímiles. El acuerdo cubre el escaneado de las *tumbas de Seti I, Nefertari y Tutankamón* y la finalidad del proyecto radica en la conservación preventiva y freno del deterioro del interior de la tumba (Factum Arte, 2009).

La empresa Factum Arte desarrolló un programa piloto para el registro de una sección de la *tumba de Seti I*, para lo cual diseñó un escáner 3D específico, al que se le dio el nombre de *Seti*. Con él se escanearon cuatro secciones de la tumba en el 2001 y el trabajo resultante fue mostrado en una exposición del Museo Arqueológico Nacional de Madrid en 2003, mostrando la réplica de 16 m² de los relieves y pinturas de la pared sur de la cámara mortuoria de la *tumba de Seti I* junto con un vídeo y otros documentos que

⁷⁷ La misión principal del Ministerio de Estado de Antigüedades, anteriormente conocido como el Consejo Supremo de Antigüedades, es proteger y promover el patrimonio cultural de Egipto, tanto de forma independiente como en cooperación con organizaciones nacionales e internacionales (Supreme Council of Antiquities, s.f.).

⁷⁸ La asociación Amigos de las Tumbas Reales fue fundada en 1988, en asociación con el gobierno egipcio, y tiene como objetivo la preservación de las tumbas reales (SCA).

ilustran el complejo proceso de producción (De la Torre, 2003, p.39). Silvia Rosende y Juan Carlos Andrés (2003, p.23), del Departamento de Escultura de Factum Arte, afirmaron que se había conseguido, sin tan siquiera tocar el original, la mayor reproducción hasta el momento conseguida, gracias al innovador proceso y a la más alta tecnología aplicada. Se había logrado reproducir todos los detalles de las complejas superficies de los muros decorados en bajorrelieve y policromías del Imperio Nuevo de Egipto.

Los datos digitales obtenidos en la *tumba de Seti I* constituyen actualmente un valioso recurso para el estudio y preservación de las tumbas, dando la oportunidad, además, al público, de visitar la tumba sin deteriorar el original. Tras el éxito del programa piloto, y siendo la idea original comenzar con el facsímil de la tumba completa de *Seti I*, los planes tuvieron que ser modificados, debido a los hallazgos y los continuos trabajos de excavación realizados en el pasadizo de la cámara funeraria, por lo que finalmente hubo que comenzar con *Tutankamón* (Factum Foundation, s.f. b).

En noviembre de 2008 se aprobó el proyecto, por lo que en 2009 se registraron la cámara funeraria y el sarcófago, con la mayor resolución y a una escala jamás alcanzada con anterioridad, superando los resultados obtenidos en *Seti I*. Los trabajos comenzaron por lo tanto en 2009 y desde el primer momento hubo serias dificultades para la realización del escaneado: el equipo fue retenido en las aduanas egipcias durante 12 días y llegó seriamente dañado porque el camión que lo transportaba sufrió un accidente, de modo que hubo que repararlo. También es importante destacar que cada tumba escaneada presenta retos específicos, por lo que se hubo que modificar el equipo para poder trabajar en un espacio tan reducido como la *tumba de Tutankamón*, ya que el equipo había sido diseñado para la de *Seti I* (Factum Arte, 2012). A todas estas dificultades, se ha de añadir que a lo largo de todo el proceso la tumba permaneció abierta al público, siendo una de las cláusulas del contrato que los trabajos fuesen desarrollados sin interrumpir el flujo normal de visitantes, por lo que las dificultades aumentaron notablemente, ya que aproximadamente 1.000 personas visitaban la tumba en días de gran afluencia. Durante la digitalización, la prioridad en todo momento fue la seguridad, por lo que se tomaron todas las medidas necesarias para garantizar que la tumba, el equipo personal y el equipo de grabación estaban en todo momento protegidos (Factum Foundation, s.f. e).

Para obtener el mejor registro posible, se emplearon diferentes tecnologías de escáneres 3D, trabajando con tres enfoques⁷⁹; además, se utilizó la fotografía de alta resolución a tamaño real y, por último, se realizó un detallado estudio de la colorimetría de la superficie.

Por su parte, Naoko Fukumaru, conservadora de Factum Arte, se encargó de realizar una monitorización del equipo y del proceso, volcando una especial atención en la seguridad de la tumba.

Con todos los datos necesarios ya escaneados y fotografiados el equipo regresó a Madrid y comenzó a trabajar en las diferentes fases de la producción del facsímil. (Factum Foundation, s.f. e).

Así, cuando los archivos digitales estuvieron listos para ser impresos, se realizaron los muros del sarcófago. Para la reproducción de los mismos se empleó una fresadora⁸⁰ y posteriormente se realizó el molde y vaciado en resina de poliéster⁸¹ de cada panel fresado. Una vez los paneles se encontraban listos para recibir la transferencia de color en forma de película, se subcontrató a la empresa PapelGel®. Mientras, recordando los alzamientos populares en los países árabes que en Egipto comenzaron el 25 de enero de 2011, la situación en Egipto se complicaba, por lo que las entregas se vieron aplazadas, ampliándose notablemente los plazos de entrega. Con la llegada del verano, a pesar de las numerosas precauciones tomadas, las transferencias en forma de película realizadas en los muros fresados comenzaron a presentar signos de desprendimiento del soporte. El deterioro surgió al principio en forma de burbujas, que terminaban ampliándose y

⁷⁹ Se emplearon por un lado el escáner 3D SETI de luz láser roja de baja intensidad, desarrollado en 2001 para *Seti I*. Este equipo fue utilizado durante 14 días para registrar los pequeños extremos de los sarcófagos y unos 2m² de la sección este del muro norte, así como 5m² de la pared este. Por otra parte, también se empleó un, escáner de luz blanca, adecuado para registrar el relieve en general de los muros y el sarcófago. Este equipo se utilizó los primeros días en la tumba para hacer un estudio de las diferentes partes constituyentes de la misma, registrando los volúmenes generales, para lo que fue necesario modificar las cámaras según las necesidades.

⁸⁰ Fresadora empleada a una resolución submilimétrica en planchas de resina de poliuretano de baja densidad y de un tamaño por plancha de 1mx1m, siendo el tamaño máximo que admitía la fresadora. También se utilizaron planchas de poliuretano de alta densidad cuando se precisaba fresar con mayor detalle, ya que, al aumentar la densidad del material, se incrementa su dureza, por lo que los archivos con un tamaño mayor pueden ser fresados y reproducidos fielmente. Los límites de cada plancha, que conformarían la separación entre un panel y otro, fueron calculados de modo que coincidiesen con los perfiles de las figuras, para que, en el proceso de junta, éstas fuesen lo más invisibles posible.

⁸¹ Material escogido debido a sus características, recordando que destaca por ser termoestable y goza de una fuerte consistencia y dureza, cualidades imprescindibles para constituir los muros.

separándose de su base, como si la transferencia se estuviese “pelando”⁸², por lo que se retiraron éstas por completo. Mientras, la empresa trabajaba en la producción del facsímil del *Mapa de Bolonia*, en el Vaticano, y descubrió la manera de aplicar color en alta resolución sobre una superficie ondulante⁸³.

Los datos obtenidos en el escaneado del sarcófago fueron también fresados en diferentes planchas de resina de poliuretano, siguiendo el mismo proceso de reproducción que en los muros. En este caso, la diferencia vino dada en el material final de vaciado, empleándose para el sarcófago resina epoxi combinada con multitud de cargas minerales, a fin de imitar su materia constituyente original. Éste está tallado en un solo bloque de cuarcita roja y apoya en las esquinas sobre un bloque de alabastro (Factum Foundation, s.f. c). Para la reproducción de la tapa, fue empleado un estuco mármol, siendo el mejor modo de imitar el material original (Factum Arte, 2009).

Tras más de diez años de trabajo, en diciembre de 2013 el facsímil exacto de la *tumba de Tutankamón* llegó a Luxor (Factum Arte, 2014). El nuevo complejo museístico y arqueológico que alberga la reproducción ha sido construido bajo tierra y tiene como objetivo permitir a los visitantes la oportunidad de comprender la historia de las tumbas desde su descubrimiento, fomentar la conservación del sitio original y establecer Egipto como líder mundial de aplicación de tecnología y habilidad manual. A su vez, como en el caso de *Altamira*, los ingresos generados son empleados para continuar investigando y documentando, garantizando la conservación a largo plazo de la *Necrópolis de Tebas*. Tras los problemas sufridos en el país durante los últimos años, el turismo ha descendido notablemente, por lo que actualmente es posible visitar ambas tumbas, ya que la original no ha sido aún cerrada y cuando las visitas masivas a Egipto sean retomadas por parte de los turistas, *Tutankamón* cerrará sus puertas, quedando abierta únicamente a especialistas e investigadores (Bbc, 2014).

⁸² Además, a medida que se estudiaba la superficie para conocer la causa del problema, se pudo observar que los fallos no se limitaban al deterioro, sino que en la resolución de la imagen impresa faltaba numerosa información, sobre todo la referente a los medios tonos y a la necesaria textura característica del antiguo muro.

⁸³ Se combinó una emulsión creada por Rafa Rachewsky, del departamento de impresión de Factum, y la mezcla de materiales flexibles de Silvia Rosende, creando lo que denominaron “piel”, constituida por una fina membrana elástica, que se imprime sin pérdida alguna en la calidad de la imagen. Para su aplicación, el material se coloca manualmente en la posición exacta en la que debe quedar, con un adhesivo. Cuando las transferencias de color han cubierto todo el panel y están en la posición correspondiente de la superficie, se coloca el conjunto en una bolsa hermética y se succiona, eliminando todo el aire que contiene, a modo de envasado al vacío. Así el adhesivo cura y todo queda perfectamente adherido.

El nuevo complejo, que acoge la instalación del facsímil en una de las salas mientras que el resto constituye una exposición, se sitúa en la entrada al *Valle de los Reyes* a veinte pasos de la antigua casa de Carter, convertida desde hace años en museo. En la muestra se ha instalado una pantalla en la que se reproduce un documental que narra los problemas que las tumbas presentan, así como los factores que los agravan, recordando a los visitantes que la tumba fue creada para perdurar eternamente pero no para recibir masivas visitas que la deterioren. Se cuenta, además, con pantallas de alta resolución que permiten a los visitantes estudiar las pinturas con mucho más detalle que en el original.

En la inauguración se anunció el próximo comienzo de los trabajos para la creación de un centro de formación y talleres en *Luxor*, para llevar a cabo la digitalización y producción de facsímiles de las *tumbas de Seti I y la reina Nefertari* (recordando su inclusión en el proyecto acordado), que serán también instalados en la zona⁸⁴. De este modo, un equipo egipcio será convenientemente instruido por Factum Arte y podrá realizar la compleja tarea de documentar el resto de las tumbas.



Fig. 238 Vista desde la esquina noroeste de la tumba mirando hacia la zona del museo. ©Factum Arte.

La realización de este facsímil conlleva otras intervenciones y aplicaciones, que serán expuestas en los siguientes subapartados y capítulos, tales como la visualización de

⁸⁴ Actualmente, el Consejo Supremo de Antigüedades egipcio ha decidido reabrir las sepulturas de *la reina Nefertari y el faraón Seti I* al precio de 100 euros por entrada, constituyendo una drástica medida justificada tras cinco años consecutivos de caída en los ingresos (Carrión., 2016).

las imágenes en alta resolución, basada en la tecnología Openzoom, que se revisará en el capítulo 7; o el plan de monitorización en KV 62, tratado en el capítulo 4.

También es fundamental destacar que numerosas instituciones y organismos de todo el mundo han optado por sustituir piezas originales localizadas en emplazamientos exteriores por sus reproducciones, con el fin de protegerlas de factores medioambientales adversos. Con esta medida de conservación preventiva se permite exponer la reproducción mientras el original se exhibe en un entorno museístico. La acusada contaminación ambiental de los últimos decenios, así como los actos vandálicos reiterados afectan seria y alarmantemente a la escultura pública, por lo que en numerosos casos se opta por sustituirlas por réplicas (Negrete, 2003, p.81).

6. 2. 4 Difusión de las obras

Volviendo a la utilidad de la realización de reproducciones, actualmente escuelas, facultades y academias de arte continúan haciendo uso de las mismas, dada su importancia para la formación del artista durante gran parte de su vida académica y en muchos casos, profesional. Además, con ello se logra la difusión de las obras sin que el original abandone su ubicación habitual en el museo. Con ello se evitan posibles deterioros.

En España, además de la anteriormente citada Real Academia de Bellas Artes de San Fernando, existe un museo de reproducciones en Bilbao. Desde 1916 el pueblo de Bilbao demandaba la creación de diferentes instituciones museísticas, entre ellas una Colección de Reproducciones que complementase las de los museos Etnográfico y de Bellas Artes del momento. En 1922, D. Manuel Ramírez Escudero presentó una moción a la Junta de Cultura Vasca para la creación de un Museo de Reproducciones, el cual, transcurridos ocho años, abrió sus puertas (Bilboko Berreginen Museoa, s.f. a).

Tendrán que transcurrir ocho años aún hasta que la institución se haga realidad y abra sus puertas a la ciudadanía. Años de enormes vicisitudes durante los cuales los promotores del Museo tratarán de conseguir de las instituciones – Ayuntamiento y

Diputación- los apoyos necesarios para impulsar el proyecto, dotarlo de una sede y, lo más importante, de una Colección de piezas.

Actualmente, el museo cuenta con numerosas obras tales como *Afroditia y Dione*, *El Apolo del Belvedere*, *El Auriga de Delfos*, *La Cariátide del Erecteion*, *El Laocoonte y sus hijos*, *El Niño de la espina*, las *Venus de Cnido*, *de Milo y de Esquilino* y *La Victoria de Samotracia*, procedentes de algunas de las mejores instituciones museísticas europeas (Bilboko Berreginen Museoa, s.f. b).

El museo realiza, entre otras actividades, cursos de dibujo donde los alumnos pueden aprender el Dibujo Clásico dibujando las reproducciones.



Fig. 239 Alumna y maestra dibujando una de las reproducciones. ©Bilboko Berreginen Museoa, Museo Reproducciones Bilbao

Como ejemplo de esta labor divulgativa, pueden también citarse los numerosos museos que cuentan con reproducciones de huesos de dinosaurios. Es realmente muy frecuente que los paleontólogos y antropólogos realicen réplicas de estos huesos, sorprendentemente realistas. Por ello, la mayoría de las que se exhiben en los museos son reproducciones de gran calidad, siendo las más recientes muy difíciles de distinguir de los auténticos huesos. Los grandes museos de dinosaurios muestran al público excelentes réplicas de sus mejores especímenes posibilitando la realización de montajes e intercambios múltiples con otros museos que puedan necesitar un determinado ejemplar para exponerlo o estudiarlo. De este modo, es común que un solo esqueleto origine docenas de copias casi idénticas.

Por ejemplo, el Doctor Druckenmiller, Paleontólogo del Museo de Ciencias de la Tierra y Profesor Asociado de Geología en la Universidad de Alaska en Fairbanks, trabaja con la tecnología 3D para la recuperación de fósiles de dinosaurios. Gracias a su trabajo se ha avanzado y generado un mejor entendimiento colectivo de numerosas especies de dinosaurios. En 2015 publicó los resultados de la identificación de una nueva especie, el *Ugrunaaluk kuukpikensis*. La complejidad de clasificar y categorizar los especímenes presenta un significativo reto para los investigadores que excavan, puesto que es común que miles de huesos desarticulados convivan mezclados y aparenten proceder de las mismas especies, lo que significa que, para encontrar una pareja exacta de huesos derecho e izquierdo, para una pierna o el cráneo, es prácticamente imposible. Con el reto de ensamblar el cráneo de la nueva especie dinosaurio, Druckenmiller colaboró con Michael Holland, especialista en escáneres e impresiones 3D empleados para el estudio de dinosaurios. De este modo, digitalizaron los vaciados de los fósiles con el escáner 3D Capture de Geomagic, posteriormente, empleando el archivo en programas de 3D, emplearon las herramientas de espejo para replicarlos de forma precisa virtualmente, obteniéndose las parejas de los huesos.



Fig. 240 Sayers y Holland comenzaron la exploración empleando moldes de yeso de los huesos seleccionados, en lugar de los fósiles originales. Sayers utilizó el escáner 3D Geomagic Capture para el trabajo. ©Goal-Tech.

Actualmente, puede afirmarse que solo es posible conseguir estos resultados empleando la tecnología 3D. Una vez la información STL de las réplicas en espejo estaban listas para su impresión 3D, se empleó la impresora de colores ProJet 660. Holland afirmó que:

Normalmente usamos las características a todo color de estas impresoras, pero esta vez preferimos las impresiones en un solo color para poder agregar acabados realistas. Las partes impresas en la ProJet 660 son rígidas, parecen huesos reales y trabajan muy bien al ser pegadas o al usar clavos para la construcción de esqueletos, así que fue una selección perfecta (Goal-Tech, s.f.).

También están trabajando para crear 3 esqueletos completos para una exhibición y el escaneo y la impresión 3D consiguen que los resultados se obtengan más rápidamente que trabajando de modo tradicional.

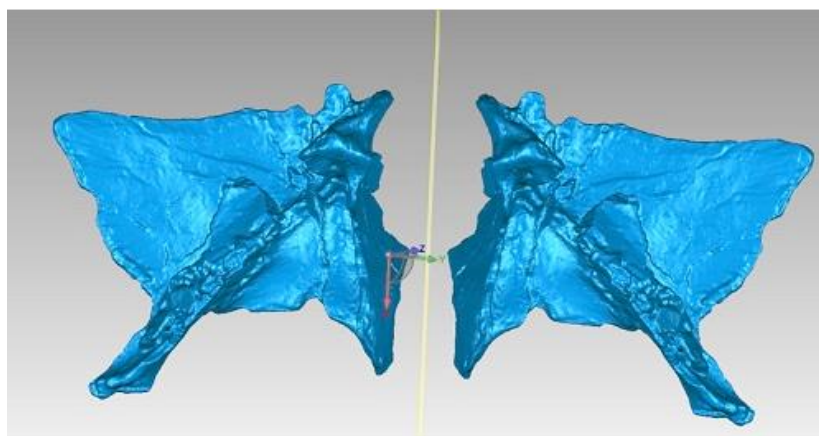


Fig. 241 Duplicado de los huesos con la función de espejo en Geomatic. ©3D Cad Portal.

Druckenmiller afirma que:

Este es un ejemplo real y asombroso de cómo el escaneo y la impresión digital están revolucionando lo que hacemos en nuestra profesión, no sólo para la exhibición sino para la investigación en su conjunto. Como resultado, pudimos reconstruir una nueva especie de dinosaurio para la exhibición más rápido que nunca. (3D Cad Portal, 2015)

Existen también empresas dedicadas a realizar estas reproducciones. Como ejemplo de estas actuaciones puede citarse la empresa Gondwana Studios, líder mundial en la construcción de elementos expositivos para museos, reproducciones científicas y exposiciones itinerantes. Es una empresa especializada en la producción de réplicas científicas de material fósil aptos para exposiciones en museos y como material de investigación para universidades, que pueden venderse y alquilarse (Gondwana Studios, 2012). También debe ser mencionada la empresa Bone Clones, Inc., Osteological Reproductions, empresa estadounidense que trabaja en la reproducción tanto de esqueletos de zoología como de humanos y primates. Sus clientes varían desde museos y universidades hasta compradores privados (Bone Clones, 2007).

Del mismo modo, el Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid, cliente precisamente de la empresa Bone Clones, tal y como se verá en el capítulo 9, cuenta también con una colección de Paleontología de vertebrados fósiles que configuran una importante colección de referencia temporal y geográfica. Por ello, el museo realiza réplicas de los ejemplares fósiles más representativos, tanto para exhibición como para intercambio con otros centros de investigación. Existen más de 1.000 matrices que el Laboratorio de Restauración de Fósiles se encarga de aumentar año tras año. Por otro lado, el museo cuenta con reproducciones cuyos originales no pertenecen al museo y que tienen muy diverso origen (Museo Nacional de Ciencias Naturales, s.f.).

Para finalizar con la idea de la realización de reproducciones a fin de difundir las obras, puede decirse que existe un gran número de ellas que permanece en un ámbito privado, por lo que son inaccesibles al público. Ejemplo fundamental de la importancia que tiene la realización de un facsímil, constituye posibilitar la visita del público a éstas.

Como ejemplo, puede incluirse el caso de la reproducción de la Sala Bolonia, situada en un área del Vaticano que no está abierta a los visitantes.

La *Sala Bolonia* fue construida en 1575 y decorada muy particularmente, dado que en la pared fue realizado un fresco representando un mapa. Esta muestra la ciudad de Bolonia en el momento de su creación, por lo que constituye un documento fundamental para la historia de la ciudad, y artísticamente, constituye el mapa más grande jamás

trasferido a un muro en forma de pintura. El proyecto de realización de la reproducción fue llevado a cabo debido a la importancia que el mapa tiene para los ciudadanos de Italia, así, como para la historia de la cartografía (Factum Arte, 2013a).

La empresa Factum Arte, con el pertinente permiso de los Museos Vaticanos, se encargó en mayo del 2011 de producir el facsímil del *Muro Sur de la Sala Bologna*, que contiene el mapa; actualmente se encuentra instalado en el Museo de la ciudad de Bolonia. (Factum Foundation, s.f. a). El trabajo realizado hizo posible su visualización por parte del público general.

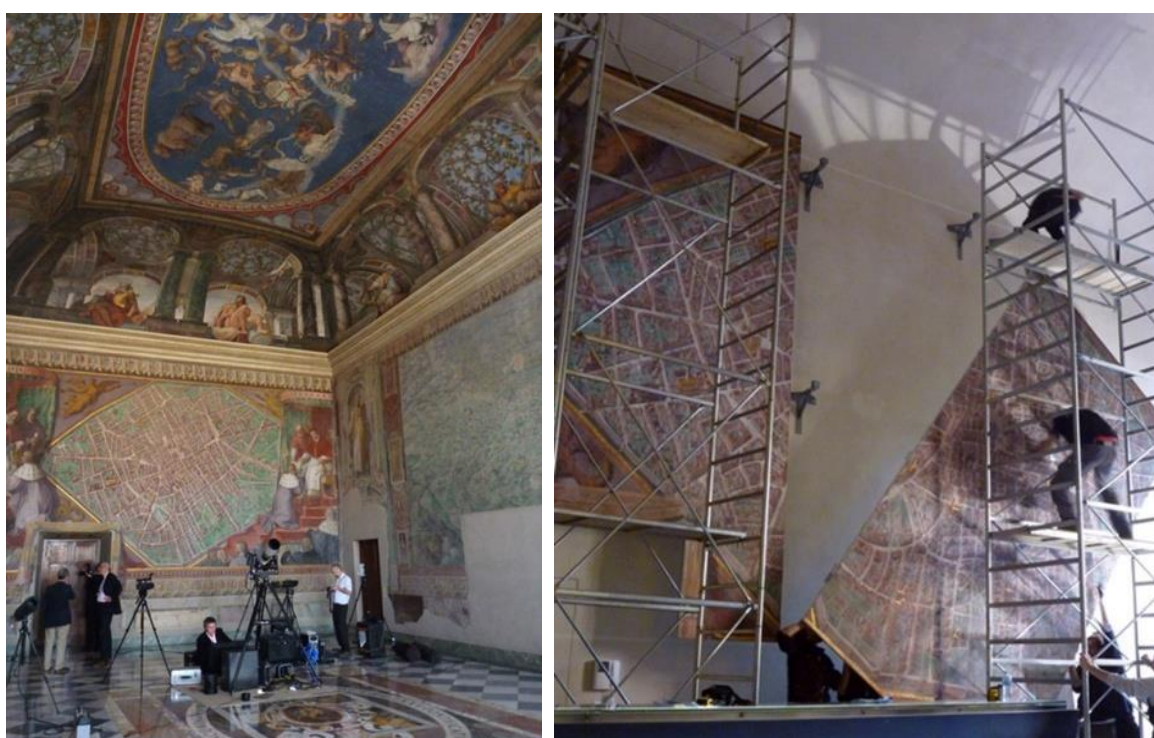


Fig. 242 Facsímil de la Sala Bologna del Vaticano: a la izquierda el equipo obteniendo la documentación necesaria para el proyecto y a la derecha la instalación de la reproducción. ©Factum Foundation.

6. 2. 5 Restitución de partes originales que se han de guardar separadas o bien se han perdido

En numerosas ocasiones, existen partes originales que bien han de ser almacenadas por separado, ya sea motivos de seguridad, de conservación, etc. o bien han desaparecido y solo gracias a las nuevas tecnologías queda constancia de su existencia.

Cuando la *tumba de Tutankamón* fue descubierta, Carter se vio en la obligación de retirar un fragmento de una sección del muro sur de la tumba con el fin de facilitar la extracción de los objetos que allí se hallaban. El arqueólogo custodió el fragmento separado del original, en este caso la tumba, y fue fotografiado en 1922 por Harry Burton⁸⁵, conocido como el fotógrafo de faraones. Desafortunadamente, el fragmento finalmente desapareció, por lo que se encuentra en paradero desconocido y sólo gracias a la fotografía tomada entonces y a raíz del proyecto y las investigaciones realizadas para la producción del facsímil de *la tumba de Tutankamón*, fue posible que el fragmento perdido fuese reconstruido y actualmente sea expuesto en la muestra. La pieza ha sido realizada en colaboración con el Instituto Griffith de Oxford, a partir de la información extraída de las fotografías tomadas por Burton. Con el archivo procesado en alta resolución, Factum Arte ha reconstruido el color acorde con los datos obtenidos en el escaneado en alta resolución realizado en la tumba. La reintegración del tramo faltante constituye una labor fundamental ya que, mientras el original no aparezca (sin que por ello se dé por finalizada la búsqueda del fragmento original), se establece esta réplica del fragmento como un importante testimonio de su pasada existencia (Factum Foundation, s.f. g).



Fig. 243 Fragmento del Muro Sur de la *tumba de Tutankamón*. ©Factum Foundation.

⁸⁵ En 1904, Harry Burton (1879-1940) fue contratado como miembro de la sección gráfica para fotografiar los interiores de las tumbas y más tarde para grabar el trabajo del equipo de excavación del Museo Metropolitano. Burton ganó rápidamente una reputación como el mejor fotógrafo arqueológico de su tiempo. Por lo tanto, cuando Howard Carter descubrió la tumba de Tutankamón en 1922, rápidamente pidió al Metropolitano el préstamo de los servicios de Burton. Durante los siguientes ocho años, Burton divide su tiempo entre Tutankamón y la expedición egipcia. (The Metropolitan Museum of Art, s.f.)

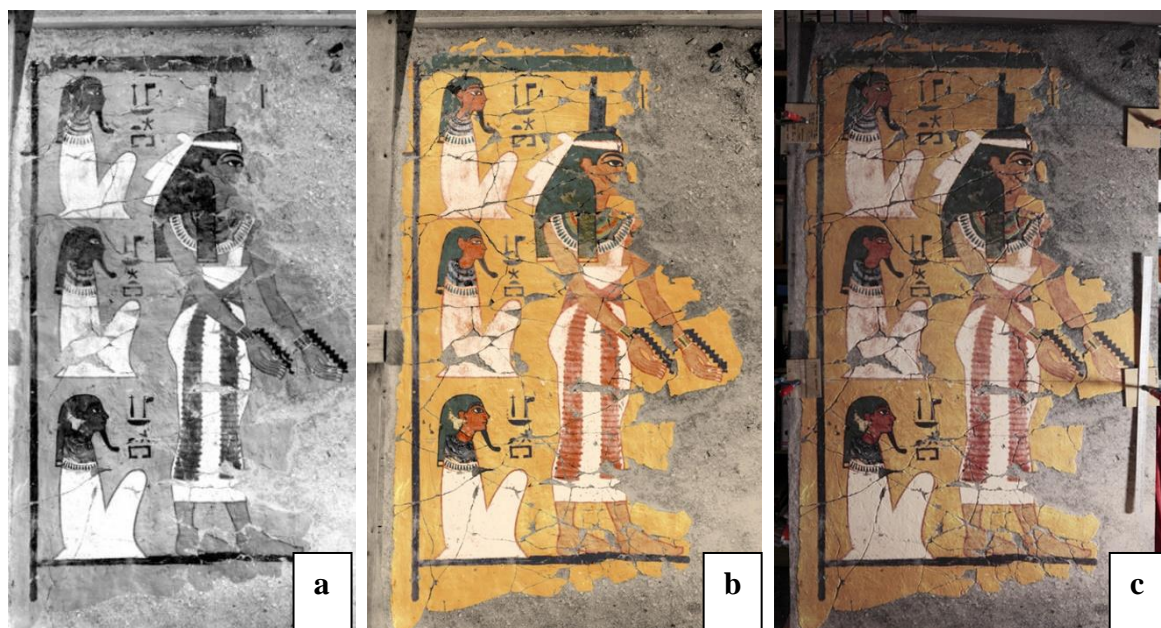


Fig. 244 Fragmento del Muro Sur de la *tumba de Tutankamón*: a) detalle en alta resolución de la sección desaparecida. ©Howard Carter/Factum Foundation; b) reconstrucción digital del color a partir de los trabajos e investigaciones realizados. ©Factum Foundation; c) materialización de los datos obtenidos en el estudio e investigación sobre el fragmento. ©Factum Foundation.



Fig. 245 La pared sur se instaló en el espacio de exposición que conduce al facsímil de Tutankamón. ©Factum Foundation.

6. 2. 6 Garantizar el testimonio histórico material de las piezas

En este caso se ha de recordar el proyecto *The Sculpture Replica Project*, anteriormente citado en el capítulo 4. Tal y como ha podido observarse, numerosas esculturas de Naum Gabo están realizadas total o parcialmente en distintos tipos de plástico, como los especialmente frágiles acetato y nitrato de celulosa; por lo que durante los primeros años del 2000 surge la necesidad de realizar réplicas de sus obras como medida de conservación preventiva. Así a principios de 2006, la hija y titular de los derechos de autor de Naum Gabo, Nina, acuerda con la Tate, tras años de negativa, un permiso para realizar réplicas de algunas de sus piezas (Williams, N. & Williams, G., 2007). Se puso entonces en práctica un proyecto entonces pionero, consistente en realizar reproducciones de algunas esculturas. Estas habrán de mostrar siempre la palabra réplica (Heuman & Morgan, 2007).

Tras llevar a cabo una documentación tradicional de las piezas seleccionadas, en la que se incluyeron los datos de las obras y toma de fotografías mostrando todos sus ángulos y detalles, se buscó un método adecuado para la documentación en tres dimensiones. La investigación desarrolló una metodología de trabajo que implicaba el empleo de tres técnicas de registro diferentes: el escáner láser, la fotogrametría y el palpador. Cuando se combinaron los datos de las tres técnicas fue finalmente posible construir precisos modelos informáticos tridimensionales de las dos esculturas (Williams, N. & Williams, G., 2007).

Tras esta experiencia, el proyecto incluye la digitalización de la obra completa de Gabo, de modo que toda ella está documentada y los datos registrados sirven para construir modelos o partes de las esculturas si la degradación llega a hacerse muy evidente. (Heuman & Morgan, 2007).

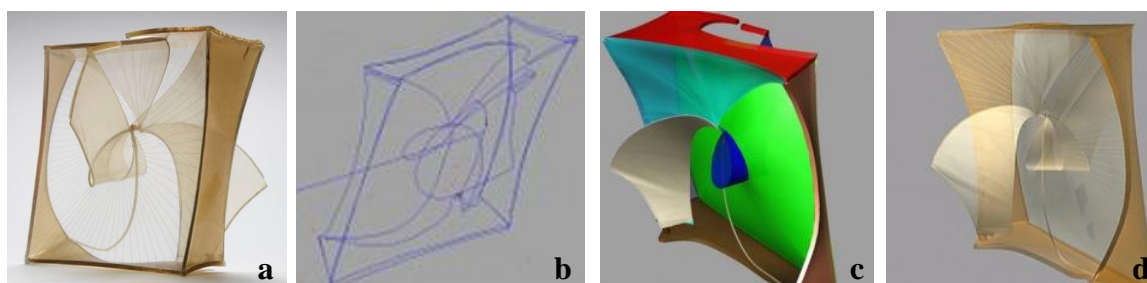


Fig. 246 Proceso de digitalización del proyecto: a) *Construction in Space (Crystal)* de Naum Gabo, 1937-9, Acetato de Celulosa, 220 x 270 x 180 mm. ©Nina Williams and Graham Williams/Tate; b) primeras exploraciones de los datos de la escultura. ©Nina Williams; c) imagen coloreada para mostrar las diferentes secciones con las que la escultura fue construida. ©Nina Williams; d) resultado final del proceso de digitalización. ©Nina Williams.

También, como se indicó con anterioridad en el apartado 6.2.3. es fundamental destacar que algunas instituciones y organismos nacionales han optado por sustituir piezas originales localizadas en emplazamientos exteriores por sus reproducciones, como se ha indicado, con el fin de protegerlas de factores medioambientales adversos. La acusada contaminación ambiental de los últimos decenios afecta seria y alarmantemente a las esculturas, por lo que en numerosos casos se opta por sustituirlas por réplicas (Negrete, 2003, p.81).

Por otra parte, en los últimos años ha surgido una epidemia de robos de cuernos de rinoceronte en museos, casas de subastas y colecciones privadas en toda Europa. Estos se venden más caros que el oro y un sólo cuerno puede venderse por más de un millón de dólares. Desgraciadamente, curanderos de todas partes (especialmente asiáticos) aseguran que la mezcla resultante de la molienda del cuerno con alcohol cura todo tipo de dolencias y enfermedades, incluyendo el cáncer, de ahí que sea tanpreciado, buscado y consecuentemente, costoso. Todo ello conlleva que estos cuernos sean robados continuamente. Cabe destacar el caso del rinoceronte de Java, especie extinta en Vietnam en 2010. Desde ese momento los cazadores del país postularon por permisos para ir a Sudáfrica, hasta que estos fueron vetados en 2012 y bandas del crimen organizado han estado abasteciendo el mercado asiático (Ventura, 2014).

Según Europol⁸⁶, más de 100 robos de cuernos de rinoceronte en todo el mundo han sido registrados desde 2011, la mayoría en Europa. En abril de 2013 cuatro cabezas, con ocho cuernos en total, desaparecieron de los almacenes del Museo Nacional de Dublín (Díaz, 2013). Tres de las cabezas, que tenían más de un siglo, pertenecían a ejemplares de la especie *Diceros bicornis* (negro) de Kenia y la última, a la especie extinta *Ceratotherium simum* (blanco) de Sudán (Abc.es, 2013). En 2011 dos extranjeros fueron detenidos en Lisboa por robar 6 astas de rinoceronte, dos de las cuales pertenecían al Museo de Historia Natural de la Universidad de la ciudad de Coímbra. En España unos ladrones entraron en el Museo de Fauna Salvaje de Valdehuesa, en León, y robaron tres cuernos en enero de 2012, así como en un Instituto de Alicante y a particulares. El récord no obstante se lo lleva Alemania, que hasta noviembre de 2012 registró 15 de los 67

⁸⁶ Europol es la agencia de la Unión Europea encargada de que la ley sea correctamente aplicada y tiene como principal objetivo ayudar a lograr una Europa más segura para el beneficio de todos sus ciudadanos (Europol, 2016).

asaltos europeos, sin contar con 15 intentos fallidos. Francia registró 11 robos, Reino Unido 8, España 6 e Italia 5 (Díaz, 2013).

Los robos de estas piezas, por tanto, también han dado lugar a la realización de reproducciones. Se colocan réplicas en el lugar que ocupan los cuernos de los rinocerontes en ocasiones incluso antes de que se produzca el robo, a fin de evitar la desaparición del original.

Respecto a los robos o desapariciones de obras de arte, muy conocido es el caso de la escultura de Richard Serra *Equal Parallel/Guernica-Bengasi* (1986), propiedad del Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía. En 2006 se descubrió que la obra (de 38 toneladas de acero) se había volatilizado y que las últimas pistas sobre la misma se remontaban a 1992. El museo y el artista llegaron a un acuerdo y Serra construyó una réplica que se exhibe de nuevo en el Reina Sofía (Lafont, 2009). Para el museo, la nueva pieza ha de ser única por lo que, si apareciera la antigua, una de las dos sería destruida.

En este punto es fundamental destacar que, para el caso de lienzos o pinturas sobre tabla, la existencia de su archivo 3D posibilita además de mostrar elementos desaparecidos debido a las malas condiciones de conservación en que se exponía la obra (de lo cual puede haberse derivado la aparición de lagunas), mostrar también elementos que han podido ser encubiertos, por ejemplo, a causa de la aplicación de repintes. Como ejemplo cabe citar el famoso cuadro que aparentaba ser *Santa Catalina*, una obra manierista vulgar y que, tras el proceso de limpieza, reveló *La Dama del Unicornio* de Rafael. En este caso, la eliminación de la primera pintura ha resultado irreversible, y la documentación fotográfica que la documentó antes de la intervención, constituye un registro de cómo fue la obra durante un largo tiempo, sin embargo, estos documentos son incomparables a la calidad que un facsímil brindaría. A diferencia de una fotografía, el facsímil permite apreciar, además del color, la forma y la pincelada del artista gracias al relieve que en la fotografía no se refleja (Rodríguez Silgo, 2015, p.6).

De este modo, en abril de 2011, la empresa Factum Arte escaneó con el escáner Lúcida aún en fase de prototipo (ver capítulo 1), diferentes cuadros de Tiziano y Rubens del Museo del Prado, obteniéndose excelentes resultados. El caso del cuadro de Rubens *El*

Triunfo de la Eucaristía es muy destacable dado que el registro de la superficie se realizó antes de que este fuese restaurado.

La tabla contaba con un añadido perimetral en sus 4 lados y un engatillado, ambas modificaciones del s. XVIII que, combinadas, impedía el libre movimiento de la madera, por lo que las tablas no podían alabearse, pero producía fendas, por lo que estos añadidos debían ser retirados (López Asiaín, 2015).



Fig. 247 La imagen de la izquierda corresponde al cuadro *El Triunfo de la Eucaristía* mientras que a la derecha puede verse toda la información referente a la superficie de la obra. Las grietas y fisuras destacan notablemente, así como los añadidos perimetrales que presentaba antes de la intervención. ©Factum Arte / Museo del Prado.

Tras un largo proceso de restauración, la tabla fue expuesta en una muestra dedicada a Rubens, que llevaba precisamente el título de *El Triunfo de la Eucaristía*. La exposición tuvo lugar en el Museo del Prado del 25 de marzo al 29 de junio de 2014. En ella se recuperó la información obtenida por Factum Arte en el 2011 y se realizó un facsímil de la tabla en tamaño reducido. De este modo, podía contemplarse el facsímil del cuadro mostrando su estado antes de la restauración, gracias a la documentación registrada por la empresa. Así, la información obtenida con Lucida constituye la única documentación existente de la superficie de la obra antes de que fueran retirados los paneles añadidos (Bayod, 2015).



Fig. 248 Expuestos en la exposición podía verse, a la izquierda, la información referente a la superficie del lienzo, reproducida en yeso y sin color, para facilitar la visión de los detalles; y a la derecha una reproducción del marco que enmarcaba la obra. ©Factum Arte/ Museo del Prado.



Fig. 249 En la imagen puede apreciarse una fotografía tomada en la exposición. La flecha de la izquierda señala una pared en la que se expusieron las dos reproducciones citadas en la anterior imagen. Por su parte, la flecha de la derecha señala la localización de la reproducción del facsímil realizado al cuadro, que muestra como era antes de la intervención. ©Factum Arte/ Museo del Prado.

Unos años después, en 2003, la empresa empleó el mismo escáner⁸⁷ para digitalizar el *Mapa Mundi de Hereford* en Inglaterra. El documento, que cuenta con 700 años de historia, es un tesoro medieval que cuenta con más de 500 dibujos e inscripciones referentes a ciudades, referencias bíblicas, diferentes mitos, animales y criaturas fantásticas, entre otros elementos (Factum Arte, 2013b). Con unas dimensiones de 1,59 x 1,34 metros, el mapa se construyó en una sola hoja de vitela, piel de ternera. Se estima que fue realizado en el año 1300 y muestra la historia, geografía y destino de la humanidad tal y como se entendía en la Europa cristiana a finales de los s. XIII y XIV⁸⁸ (Mapa Mundi, s.f.). Además de la antigüedad y la importancia que presenta artística e históricamente, es una obra que científicamente es muy relevante, dado que cuenta con información referente a diferentes disciplinas académicas, por lo que su conservación es fundamental, a la par que complicada, dada la fragilidad del material constituyente del soporte.



Fig. 250 En la imagen de la izquierda puede verse el mapa y a la derecha el facsímil de la información de la superficie del mapa ya fresada y lista para su exposición en la Catedral de Hereford.

La obra se encuentra en una urna con un cristal sellado, que es retirado únicamente cada dos años para permitir su contemplación. La reproducción permite tanto a estudiosos y comisarios especializados como al público general acercarse a la superficie del mapa, algo imposible en el original dado el delicado estado de conservación en que la obra se

⁸⁷ El equipo utilizó el escáner 3D Lucida, montado sobre una estructura diseñada especialmente para aportar absoluta seguridad al mapa. También diseñó una plataforma firme para el proceso de escaneado.

⁸⁸ La parte habitada del mundo, tal como se conocía entonces, equivalente aproximadamente a Europa, Asia y África del Norte, se mapea dentro de un marco cristiano. Jerusalén está en el centro, y Oriente está en la cima (Mapa Mundi, s.f.).

encuentra. También se habilitó una página web que permite explorar el mapa en detalle. En ella, se pueden seleccionar las ciudades sobre las que se quiere obtener más información, las personas extrañas que aparecen, animales, mitos, historias bíblicas, etc. y todo ello en su apariencia original, con los tonos de colores mejorados o bien en los datos 3D obtenidos tras el escaneado (Mapamundi, s.f.). El registro digital en color del *Mappa Mundi* fue llevado a cabo mediante fotografía panorámica (Factum Foundation, s.f. d).

6. 2. 7 Repatriación de las obras en casos de conflictos

La realización de reproducciones también puede constituir una solución ante la petición de devolución de las obras originales a su origen o, como se ha comentado anteriormente, para preservarlas ante posibles desplazamientos.

En este sentido, puede hacerse referencia a la reproducción realizada de la *Dama de Elche*, obra perteneciente a los s. V o IV a.C. Esta escultura, que representa una mujer de facciones muy perfectas, posiblemente idealizadas, y ricamente ataviada, estuvo en su origen policromada y con los ojos rellenos de pasta vítrea. Su espalda presenta una oquedad que sugiere un posible uso como urna cineraria. Se le atribuye un carácter humano y divino dado que su identidad es un misterio, por lo que se le interpreta como retrato de una dama aristócrata ibera, cuyos descendientes la habrían divinizado (Museo Arqueológico Nacional, s.f.).

El busto fue descubierto casualmente el 4 de agosto de 1897, en La Alcudia, emplazamiento de la antigua ciudad de Illici, junto a la actual Elche. La obra se encontró prácticamente intacta, dado que se hallaba protegida por una serie de baldosas que la habían resguardado del paso del tiempo. De hecho, los únicos daños que la pieza presentaba habían sido causados por el pico con que su descubridor trabajaba la tierra en ese momento. La obra fue rápidamente apreciada y el descubrimiento altamente reconocido, por lo que se expuso en un balcón de una de las plazas más importantes de Elche. Dos semanas después, Pierre Paris, conocido arqueólogo francés que se encontraba en la ciudad, compró la obra para el museo del Louvre, donde se expuso con el nombre de *La Dama de Elche*. En 1941, el Gobierno español recuperó el busto y lo expuso en el

Museo del Prado, convirtiéndose en símbolo de la cultura española. Actualmente se encuentra en el Museo Arqueológico Nacional en Madrid (Factum Arte, 2003).

En el año 2002 el museo se niega a prestar la obra al Museo Arqueológico Provincial de Alicante, MARQ, que estaba preparando la instalación de una exposición temporal cuya obra principal debía ser precisamente *La Dama de Elche*. Incapaces de encontrar solución, el MARQ junto con la diputación de Alicante tomaron contacto con la empresa Factum Arte para realizar una réplica en alta resolución de la obra. La empresa documentó digitalmente en 3D la totalidad de la pieza para producir una réplica. Todo el proceso de pruebas, muestras y documentación relativa a la intervención fue incluido en la exposición, de modo que todo visitante entendiese el proceso y el origen de la pieza que estaban contemplando.

El trabajo realizado constituye el primer registro en 3D de alta resolución de un objeto que pertenece a una colección importante en España. El propósito del proyecto era mostrar la importancia que las nuevas tecnologías presentan en las tareas de documentación, control, estudio y exposición de objetos en colecciones de museos. La información obtenida con el escáner fue empleada en la producción de la réplica a escala real (1:1) de la escultura, con piedra caliza pulverizada extraída de las propias canteras de Elche. La obra fue escaneada mediante tres sistemas de digitalización diferentes: dos para captar su forma y superficie general y otro para registrar sus detalles, dado que la cantidad de oquedades y detalles que la pieza presenta dificultaron notablemente el registro. En todo momento se tomaron las precauciones necesarias y oportunas, garantizándose que la obra no corría riesgo alguno, por lo que fue instalada en una sala del Museo Arqueológico Nacional. Allí se tomaron todos los datos necesarios, bajo la supervisión del personal de conservación de la institución y la manipulación fue llevada a cabo por la empresa SIT, Transportes Internacionales. Todo el trabajo fue documentado gráficamente por diversos medios y todos los exámenes, muestras y documentación relativa al proyecto fueron incluidos en la exposición junto con fotografías, un documental y la información relativa al 3D en forma de animación (Factum Arte, 2003).

Una vez se obtuvo la obra impresa y tras haber realizado infinitas pruebas de impresión en diferentes materiales, con diferentes técnicas, etc. se procedió al patinado final.

Para finalizar el facsímil, los últimos detalles se aplicaron a pincel y se compararon continuamente con la documentación referente al original, con el fin de no alterar la apariencia de la réplica (Respuesta Creativa

/ Factum Arte, 2008).

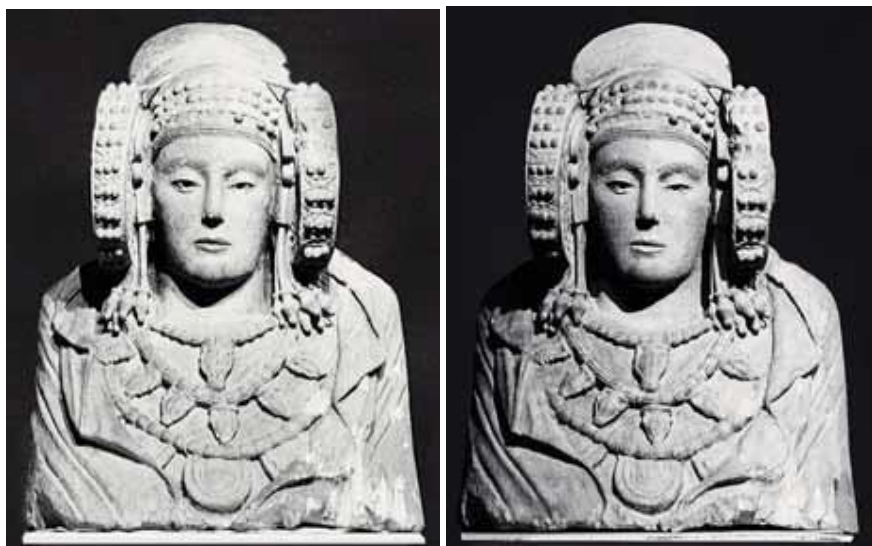


Fig. 251 A la izquierda puede verse *La Dama de Elche* y la derecha su facsímil. ©Factum Arte.

El MARQ y el Museo Arqueológico Nacional cuentan a su vez con la información digital, que constituye un valioso documento de archivo (Factum Arte, 2003).

La reproducción del busto es propiedad de la Diputación de Alicante, aunque se encuentra expuesta en el Museo Arqueológico y de Historia de Elche, MAHE, desde 2012, dado que el período de cesión temporal fue ampliado (Europa Press, 2014).

Otro proyecto realizado de nuevo por Factum Arte tuvo el mismo efecto, siendo en este caso una obra sustraída por Napoleón durante la campaña de Italia en 1797: *Las Bodas de Caná*. Esta es una tela colosal de 677x994 cm de Veronés. La posesión de la obra mantiene desde entonces en conflicto a Italia y Francia. En 2006 el Museo del Louvre alcanzó un acuerdo con la Fondazione Giorgio Cini y concedió a Factum Arte acceso para escanear el cuadro. El facsímil fue instalado en 2008 en el emplazamiento para el que originalmente fue creado: La basílica de San Giorgio Maggiore (Fernández Santos, 2014). Las condiciones del escaneado fueron detalladamente especificadas: la obra no debía ser tocada en ningún momento, por lo que debía emplearse una técnica sin contacto. Además, todo el equipo debía alcanzar las más altas especificaciones relativas a la conservación y no se podía emplear iluminación exterior ni andamios, solo podía realizarse el trabajo en horario de visita al público cerrado y el equipamiento no podría permanecer en la sala cuando hubiera público presente. Los problemas logísticos existentes a la hora de escanear

67,29 metros² fueron estudiados y valorados en profundidad, para dar solución a cada uno de ellos. Además de los numerosos escaneados y toma de fotografías, durante el proceso se tomaron notas de color en las que el color era igualado a puntos específicos de la superficie del cuadro. Con todas las muestras a punto, se fijaron éstas en un libro en el que aparecía el dibujo de la obra a escala 1:1, por lo que cada muestra se cortó y adhirió al libro en el correspondiente punto del cuadro. Una vez los datos hubieron sido perfectamente estudiados y con los archivos alineados y listos para su impresión, se materializó el facsímil con la



Fig. 252 Réplica del cuadro en la Fondazione Giorgio Cini. Dimensiones 9,55x6,98 m. ©Factum Arte.

impresora plana multicapa especialmente creada por Factum Arte, que imprimió el cuadro en diferentes paneles que más tarde fueron unidos entre sí (Factum Arte, s.f. c).

Existe un caso que fue realmente polémico y que debe citarse en este apartado: ante el conflicto entre Alemania y Egipto por la propiedad de la cabeza de reina más codiciada del mundo, los artistas Nora Al-Badri y Jan Nikolai Nelles digitalizaron clandestinamente la cabeza de *Nefertiti* en el museo berlinés, que la acoge como parte de su exposición permanente⁸⁹. Siete años se conservaron los datos, un archivo .stl de 100 MB y una densidad de 2.000.000 de polígonos, sin que fueran publicados hasta el congreso de Chaos Computer⁹⁰ en 2015. En un plazo de 24 horas, más de mil personas se habían descargado el código compartido (20Minutos.es, 2016).

⁸⁹ Sobre el modo de obtención de los datos, puesto que no se conoce la verdadera versión, se pueden encontrar fuentes que afirman que estos fueron tomados con un escáner 3D móvil, otras que se empleó una cámara y se realizó mediante fotogrametría, y otras que fue con la cámara fotográfica de un dispositivo móvil. Sin embargo, los expertos coincidieron en que la excelente calidad del archivo exigía que el trabajo hubiese sido realizado con instrumental altamente profesional.

⁹⁰ El Chaos Computer Club (C.C.C) constituye la mayor asociación de hackers de Europa. Se encargan, desde hace más de 30 años, de organizar campañas, eventos, congresos, publicaciones... entre otras actividades (CCC, n.d).

El proyecto artístico se denomina *The Other Nefertiti* y los dos artistas alemanes afirman que su intervención pasa por hacer la cultura accesible al público a través de este archivo y, ante todo, plantear la crítica sobre la posesión, por parte de Alemania de esta obra maestra, una de las más emblemáticas y conocidas de Egipto.

"*Nefertiti* representa millones de objetos robados y muertos que están enterrados en museos", dijo Nelles en una entrevista, y constituye la joya de la colección de antigüedades del museo estatal de Alemania, que aparece en carteles de toda la capital. Por ello, los artistas sostienen que el museo presenta la



Fig. 253 Impresión en 3D del busto.
©20Minutos.es.

obra sin suficiente explicación sobre cómo se obtuvo ni relativa a la polémica que acarrea su exposición en Alemania. Por su parte, ante la publicación de los datos online en la red, Birgit Jöbstl, encargado de supervisar el sistema de museos nacionales en Alemania, puso en duda la calidad y autenticidad de la exploración, afirmando por tanto que no había ninguna necesidad de reaccionar. Sin embargo, Don Undeen, del Metropolitan Museum of Art de Nueva York, lo calificó de "muy buen modelo" (Wilder, 2016).

Los artistas imprimieron facsímiles de la obra y los llevaron a Egipto en un viaje financiado por el Goethe-Institut. Según Nelles, no comentaron lo que iban a presentar hasta que se encontraron allí. Enterraron en el desierto el primer facsímil de resina y filmaron un descubrimiento escenificado del segundo facsímil, de yeso y patinado simulando el original, que posteriormente donaron a la universidad americana de El Cairo (Wilder, 2016).

De este modo, gracias al archivo, *Nefertiti* regresó al lugar donde fue hallada. Por primera vez desde que la escultura fue excavada y, afirman los artistas, “robada hace más de 100 años”, pudo mostrarse en El Cairo bajo la intervención artística *The Other Nefertiti*. A pesar de que el Neues Museum de Berlín no permite ningún acceso a los datos de la cabeza de *Nefertiti*, estos fueron colgados en la red y actualmente pueden ser descargados con el fin, tal y como indican los autores en la web, de “acceder, estudiar, imprimir o hacer un remix del conjunto de datos 3D de la cabeza de *Nefertiti* en alta resolución” en .stl a través de Torrent o bien de un enlace alternativo al programa de descarga (Nefertiti Hack, s.f.).



Fig. 254 Nora al-Badri y Jan Nicolai Nelles con la impresión en 3-D del busto de la Reina *Nefertiti* en El Cairo. ©Jan Nicolai Nelles.

Otro importante ejemplo lo constituye la obra *Nerón y Séneca*, de Eduardo Barrón, que se encuentra en el Museo del Prado. Eduardo Barrón, además de destacado escultor, fue Conservador de la Sección de Escultura del Museo del Prado desde 1892 y en 1895 se convirtió en restaurador. La obra fue presentada por su autor a la convocatoria del certamen *Las Exposiciones Nacionales de Bellas Artes* de 1904, logrando la concesión de la primera medalla. Este tipo de obras normalmente eran presentadas a los concursos en un material que entonces era considerado como transitorio, de modo que después sería vaciado en un material definitivo, como el bronce. En este caso, como en otros, la obra, sin embargo, no sería vaciada posteriormente. Con motivo de la restauración llevada a cabo en la obra, a principios del año 2000, se realizó un exhaustivo estudio técnico de la misma. Puesto que estuvo depositada en el Ayuntamiento de Córdoba, que quería disponer de un

ejemplar del grupo escultórico menos frágil que el de escayola, que se estaba deteriorando, se hizo una réplica del mismo. Considerando que la obra está realizada en este frágil material, policromado, replicarla con sistemas tradicionales de moldes directos se presentaba completamente inviable y la opción fue descartada sin dudarlo, ya que se presentaba un alto riesgo de pérdida de los colores y calidades de la superficie. Por ello la réplica, llevada a cabo por Factum Arte, se realizó mediante escaneado digital con el que se creó un modelo estereolitográfico. Sobre este modelo fue realizado el molde a partir del cual se fundió un ejemplar de bronce (fundido por Fademesa en Madrid) que actualmente se encuentra colocado en la glorieta del Pretorio de la ciudad de Córdoba (Museo del Prado, s.f.).



Fig. 255 En la parte superior aparece la obra *Nerón y Séneca* del Museo del Prado, tras su restauración. Abajo su réplica realizada en bronce y situada en Córdoba. ©Museo del Prado.



6. 2. 8 Reagrupar y reconstruir obras

Continuando con la utilidad e importancia de la realización de reproducciones, puede hacerse referencia a obras constituidas por partes que se encuentran dispersas en diferentes museos. Entre éstas, puede mencionarse el caso de la reconstrucción del *Políptico Griffoni* mediante la unión de los facsímiles realizados en alta resolución de los paneles aislados. Una vez más, participa en esta iniciativa la empresa Factum Arte. El *Polittico Griffoni* estuvo en origen constituido por dieciséis pinturas al temple sobre paneles de álamo,



Fig. 256 Una de las posibles sugerencias para la reconstrucción del *Polittico Griffoni*, donde se indica la posición de los diferentes paneles. ©Factum Arte.

pintados por Francesco del Cossa y Ercole de Roberti en el s. XV tardío. Los paneles se encontraban originalmente en la Capilla Griffoni de la Basílica de San Petronio (Bologna), pero el retablo fue retirado y vendido por piezas en el s. XVIII, que actualmente se muestran en nueve museos y colecciones de Europa y América del Norte. Con la realización de facsímiles de cada una de sus partes, se hará posible la reunificación del conjunto, que será instalado en la capilla de San Vicente Ferrer, en la Basílica de San Petronio en Bologna, donde estuvo alojado durante más de 200 años (Factum Arte, s.f. b).



Fig. 257 *San Jorge* de Ercole de'Roberti, 1472. 26.3 x 9.3 cm. Fondazione. Giorgio Cini, Venecia. Las dos imágenes de la izquierda muestran el anverso y el reverso de la tabla, mientras que a la derecha puede verse la información obtenida con el escáner Lucida, referente al anverso y el reverso de la misma, respectivamente. ©Factum Arte.

Otro de los casos que ilustran la amplia utilidad de la realización de reproducciones es el facsímil del salón del *Trono del Rey asirio Ashurnasirpal II*. Factum Arte comenzó este proyecto en 2004, realizando los facsímiles de los paneles en bajorrelieve de la sala del trono a partir de los originales que se encuentran expuestos como obras independientes en cinco museos diferentes de todo el mundo. Cuando el trabajo finalice, se conseguirá la reunificación de todas las piezas y la reproducción completa será colocada con los fragmentos en su orden original en el lugar para el que fue creada la obra. Se conseguirá así que los fragmentos sean observados en conjunto por primera vez desde que fueron separados por Austen Henry Layard⁹¹ en 1848. Se obtendrá un mayor conocimiento y comprensión tanto del arte asirio, como de la vida cotidiana en esa civilización y, por ende, la obra recuperará su contexto espacial original y se devolverá al conjunto su unidad estética (Factum Arte, s.f. a).

⁹¹Austen Henry Layard, 1817-1894, arqueólogo inglés cuyas excavaciones aumentaron considerablemente el conocimiento de las antiguas civilizaciones de Mesopotamia. En 1839 comenzó sus viajes a caballo a través de Anatolia y Siria, pasando mucho tiempo en las proximidades de Mosul, hoy Irak, y estuvo muy interesado en localizar y desenterrar las grandes ciudades de renombre bíblico (Encyclopaedia Britannica, s.f.).

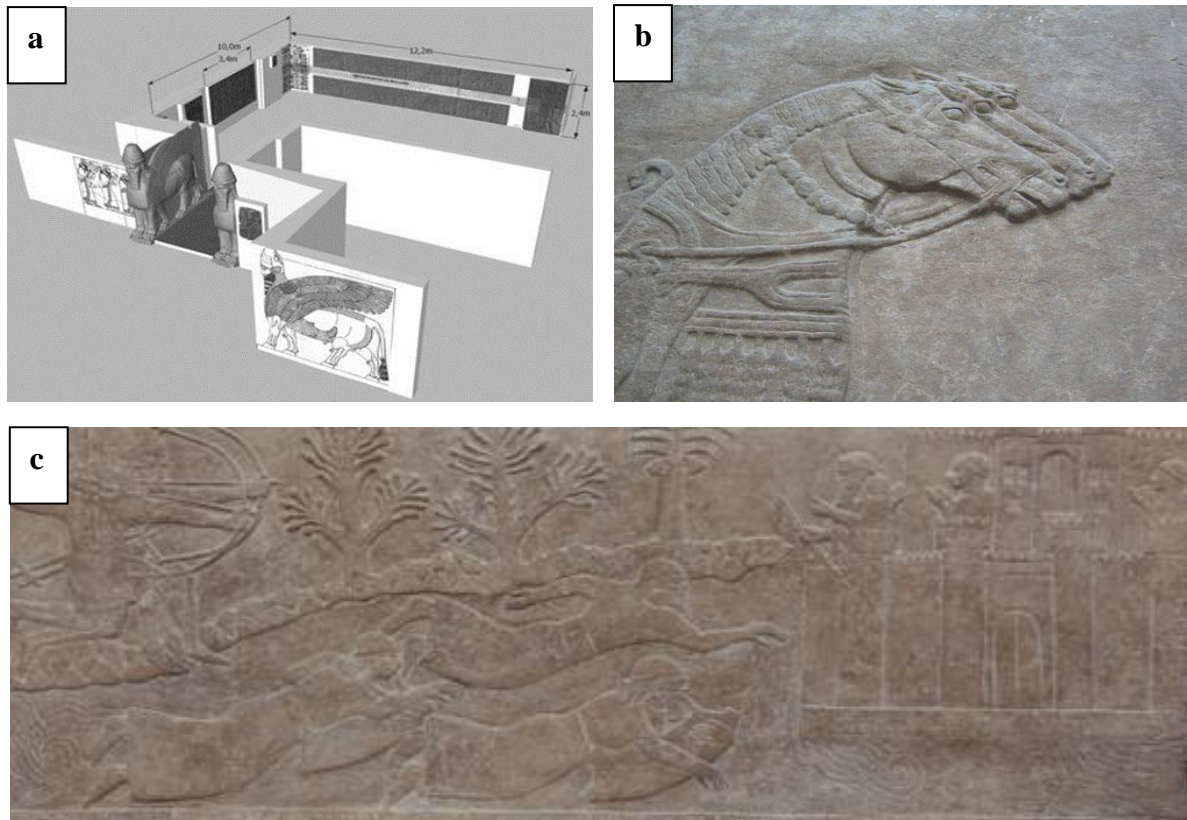


Fig. 258 Facsímil del Trono de Asurnasirpal II: a) diseño propuesto del facsímil; b) detalle de uno de los facsímiles de los paneles; c) facsímil de uno de los paneles. ©Factum Arte.

Así, por todo lo explicado, ilustrado con múltiples ejemplos, a los que aún podrían sumarse muchos más, han podido contemplarse las numerosas utilidades que la realización de reproducciones, en este caso con tecnologías 3D, tiene en el ámbito de la conservación y restauración de bienes culturales.

Capítulo 7. Utilización de las tecnologías 3D para la divulgación, didáctica e investigación del bien cultural

Los datos registrados con el escáner o con la fotogrametría; los modelos 3D generados directamente con un programa de modelado; o aquellos impresos o fresados con impresoras o fresadoras 3D, pueden ser utilizados para numerosos fines cruciales en tareas de salvaguarda del patrimonio, tales como el estudio y la difusión de la obra de arte.

El profesor emérito de Historia del Arte Charles S. Rhyne (1996), de la Universidad de Reed College, en Portland, revisó ya en los 90 en su artículo *Computer images for research, teaching, and publication in art history and related disciplines* de la revista *Visual Resources*, la importancia que las imágenes digitales adquirirían. Según el profesor, emergía en esa década la preocupación en diferentes campos sobre el futuro de las imágenes digitales, por lo que comenzaron a celebrarse conferencias y comisiones internacionales con el fin de examinar el papel de las mismas y de establecer estándares para su uso. Rhyne destacó la importancia que tenían para la historia del arte que, como bien es sabido, es una de las materias que más se apoya en ellas para su enseñanza, ya que, de otra manera, los alumnos no pueden comprender ni memorizar los conceptos generales. Con un correcto desarrollo, las imágenes constituyen un valioso potencial para la investigación, la enseñanza y la difusión a un nivel entonces inimaginable. Vaticinaba así lo que finalmente ha ocurrido en las siguientes décadas, puesto que, para él, el uso de este tipo de imágenes, por aquel entonces poco utilizadas en el mundo de la enseñanza, llegaría a ser accesible para un gran número de personas, con costes muy bajos. La calidad y los detalles de las reproducciones permitirían exploraciones y manipulaciones personales y detalladas, con lo que el estudio del arte sufriría una gran transformación. Las imágenes ocuparían su legítima posición como una evidencia esencial en las ciencias de

humanidades y las artes visuales llegarían a constituir un aspecto más centralizado y común de lo que eran en la cultura general.

7. 1 Antecedentes: ilustraciones

El desarrollo del ser humano ha dependido en gran medida de la vista; sencillamente, no es posible imaginar como el hombre habría evolucionado sin este importante sentido. Por ello, toda estimulación visual, como la televisión o los videos juegos, constituye para la raza humana un entretenimiento cautivador (McCormick, Defanti & Brown, 1987, p.6). Actualmente, los ordenadores, teléfonos móviles y tabletas, por citar algunos ejemplos, son para la mayor parte de la población tecnologías empleadas a diario durante gran parte del día, y todas estas tecnologías tienen en común que como principal característica se valen de imágenes y recursos visuales.

Los recursos visuales son fundamentales para el patrimonio puesto que la mayor parte de éste ha sido creada con el fin de que sea visualizado y apreciado.

Además, el uso de ilustraciones, de imágenes fijas bidimensionales (dibujos, fotografías, gráficos o esquemas) tiene numerosas ventajas por ejemplo en los ámbitos museísticos, entre las cuales se puede destacar que éstas impactan visualmente a las personas que las ven, reclamando directamente su atención. Se presentan de manera rápida y concisa informaciones complejas, que también pueden estar completando otros datos de interés o bien reforzando o esclareciendo aquellos conceptos que no quedaban claros con la simple exposición del objeto (Zapatero, 2007, pp.92 y 93).

Es quizás en el ámbito de la arqueología donde puede establecerse de manera más clara ese recorrido desde la imagen bidimensional hacia el entorno 3D, debido a la labor de documentación gráfica y manual que desde siempre se ha llevado a cabo en esta disciplina. Hasta hace pocos años, la recopilación de información arqueológica se basaba en la realización de ilustraciones y dibujos. En la actualidad, es en patrimonio arqueológico donde se están consiguiendo los mayores avances y aplicaciones de la tecnología 3D, favoreciendo notablemente las reconstrucciones y restauraciones virtuales. Todo lo que es

hallado en excavaciones, es decir, objetos o construcciones, generalmente se encuentran incompletos, lo que obliga a los profesionales, en muchos casos, a realizar reconstrucciones que ilustren los hallazgos. De este modo, las ilustraciones facilitan las investigaciones, estudios y por encima de todo, la difusión. A veces, por otra parte, tras una primera fase en la excavación del yacimiento, éste es cubierto de nuevo con sedimentos a la espera de poder realizar una ampliación. Por ello, toda la documentación gráfica anterior constituye un testimonio de su existencia.

El dibujo arqueológico, constituye, como se verá, uno de los antecedentes del empleo de la tecnología 3D para documentar el patrimonio. El proceso de realizar estos dibujos requiere gran experiencia y precisión al tomar la medida de lo que va a reproducirse en el papel. En su cuaderno sobre las experiencias didácticas del Museo del Cigarralejo donde se explica el dibujo arqueológico, se desarrollan las diferentes formas de realizar estos dibujos (Museos de la región de Murcia, s.f.).

Los dibujos arqueológicos tienen un modo característico de representar la información, dado que con una única ilustración se debe comprender la forma exacta, grosor de las paredes, dimensiones y decoraciones del objeto a estudiar. La exactitud de las medidas y de los dibujos que documentan los restos son fundamentales, dado que vienen a revelar datos cruciales tales como su cronología, herramientas con las que se ha fabricado y numerosa información que los profesionales emplearán en futuras investigaciones. En la realización de estos dibujos se emplea la escala 1/1 siempre que sea posible, especialmente para casos de objetos y restos pequeños. De lo contrario, se va reduciendo la escala conforme necesidad.

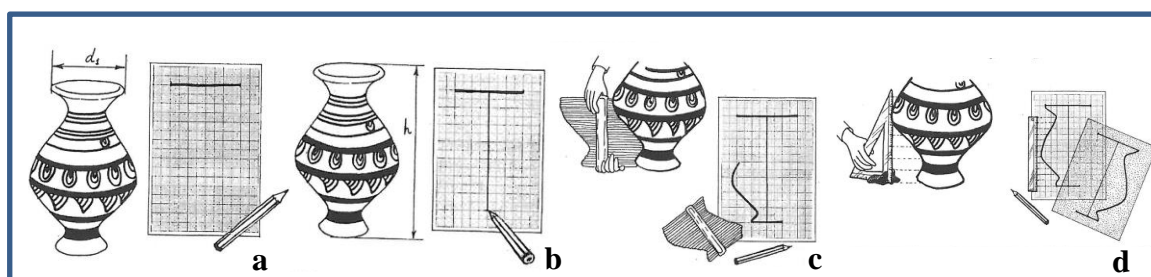


Fig. 259 Representación del proceso de realizar un dibujo arqueológico: a) medición del diámetro de la boca del objeto; b) medición de la altura, que se añade al diámetro medido; c) perfilómetro tomando el contorno de la cerámica; d) dibujo del perfil obtenido a base de tomar las medidas. ©María José Acosta Malo / Museos de la región de Murcia.

Para dibujar objetos (ver Fig. 259) se emplean escuadras, cartabones y reglas, con los cuales se representan secciones del objeto donde la información aumenta con respecto a un dibujo del natural. También es posible trasladar las medidas con un perfilómetro¹. Entonces se coloca éste sobre el papel y se pasa un lápiz por la plantilla obtenida.

Cuando la silueta completa ha sido obtenida, se pasa a un papel de seda y se traspasa al otro lado, tal y como muestra la Fig.259.

Generalmente una vez se ha completado la silueta del objeto, se ha de medir el grosor de las paredes para poder dibujar la sección, para lo cual hay que ir tomando las medidas, tal y como puede verse en la siguiente figura (ver Fig. 260).

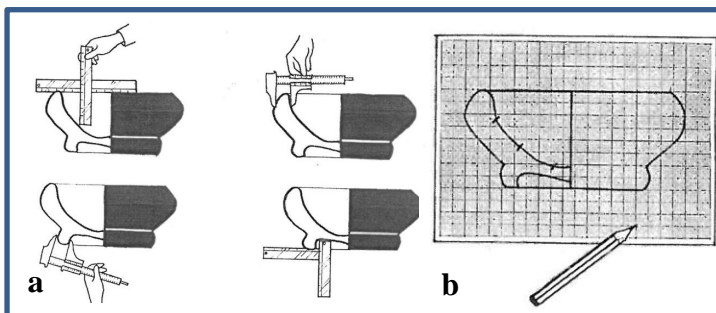


Fig. 260 a) Realizando las medidas con las reglas y el pie de rey; b) sección dibujada. ©María José Acosta Malo / Museos de la región de Murcia.

En caso de representarse estructuras arqueológicas, se emplea el reticulado (ver Fig. 261), que consiste en cuadricular el área de excavación o de los restos arqueológicos a dibujar. Una vez la zona se encuentra cuadrículada, en un papel milimetrado se representan los datos que la cuadrícula nos aporta. Para ello se emplea un metro flexible o flexómetro, facilitando el posicionamiento de los puntos medidos en el papel.

Otro modo de dibujar en arqueología es el dibujo por triangulación. Para ello se colocan dos cintas métricas, A y B respectivamente (ver Fig.262), una a cada extremo de la cuadrícula arqueológica. Estas deben estar perfectamente niveladas para que los resultados sean exactos. Se unen justo encima del punto que se quiere medir, lo cual se hará con una plomada. Posteriormente se coloca un compás en el ángulo del cuadro pintado en el papel milimetrado, que viene a

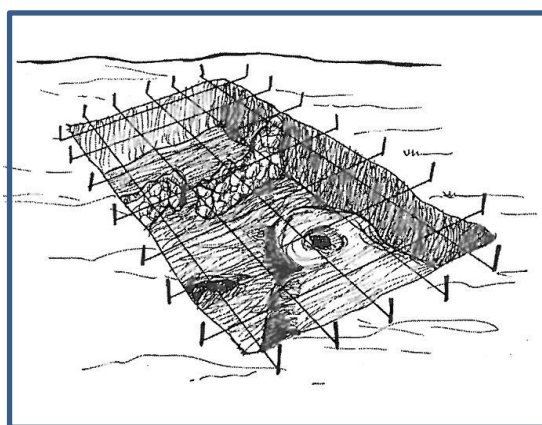


Fig. 261 Reticulado de una cuadrícula de la excavación arqueológica. ©María José Acosta Malo / Museos de la región de Murcia.

¹ Especie de peine de alambre con púas móviles que se presionan sobre el contorno del objeto y registran su perfil.

representar la esquina de la cinta A. El compás ha de tener una abertura que corresponda a la medida de la cinta A y se traza un semicírculo. Con la cinta B se repite la operación. El punto en el que se toquen los semicírculos trazados pertenece al buscado en la excavación.

De este modo se van tomando tantos puntos como se precisen, colocándolos en el papel. Finalmente se unen todos los puntos tomados para obtener el contorno de la estructura arqueológica.

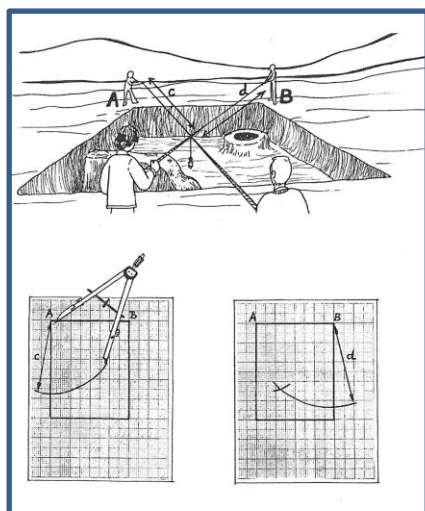


Fig. 262 Dibujo por triangulación. El punto exacto que se quiere medir lo indica la plomada que cuelga entre las dos cintas. ©María José Acosta Malo / Museos de la región de Murcia.

Dibujar el perfil estratigráfico es muy común en arqueología, dado que los objetos suelen encontrarse enterrados, y al descubrirlos, el arqueólogo va retirando las capas de tierra que lo cubren. Conforme se profundiza en la excavación, los niveles o estratos se van rompiendo, pero esta secuencia queda registrada en el perfil estratigráfico. Para que la información no desaparezca, se dibujan los 4 perfiles de cada cuadrícula realizada.

Para ello, se coloca una cinta métrica nivelada en el perfil a dibujar (ver Fig.263). El perfil escalado y la cinta métrica se representan en el dibujo. Todas las mediciones se realizan a partir de esa cinta, cada 5 o 10 cm de distancia. Primero se mide y dibuja la longitud de la cinta a los distintos puntos que forman la silueta del nivel situado debajo de la misma. Cuando se tienen todos los puntos medidos, se unen con una línea y dibujan todos los niveles, a los que se les aplica diferentes colores y tramas para facilitar su diferenciación.

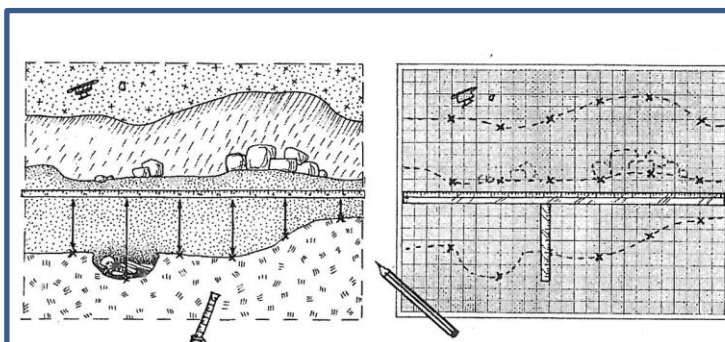


Fig. 263 Dibujo de un perfil estratigráfico en el papel milimetrado. ©María José Acosta Malo / Museos de la región de Murcia.

Como puede observarse, los conceptos referentes al volumen y a la tercera dimensión no han sido recientemente descubiertos, sino que, tal y como indican Renfrew & Bahn (2012), más bien constituyen elementos fundamentales y reconocidos desde el principio en la arqueología, que continuamente se han expresado a través de diferente documentación como planes de excavación, dibujos en perspectiva, mapas y similares (citados en Santana, 2014, p.7). Pero también es cierto que esta tridimensionalidad se ha representado generalmente de modo no muy exacto a través de un lenguaje de símbolos. Las formas de documentación gráfica en las que la arqueología se ha sustentado tradicionalmente puede reducirse esencialmente en mapas, dibujos de excavación, matrices y fotografías, todas ellas basadas en métodos de representación bidimensionales, sin que por ello deban ser criticadas o infravaloradas. Sin embargo, las ventajas que las nuevas tecnologías aportan a este ámbito deben ser desarrolladas y maduras por medio de la formación de las facultades críticas del investigador. Tal y como ocurre con la fotografía, estas técnicas no suponen una alternativa a la realidad, sino que más bien son una interpretación de la misma (Santana, 2014, p.7).

7. 2 Utilización de la tecnología 3D en la realización de visualizaciones y recreaciones

El abanico de posibilidades que ofrecen las nuevas tecnologías para el desarrollo del conocimiento es hoy más amplio que nunca (Grande, 2012, p.8). Como ya se ha indicado, en la segunda mitad de s. XX se produjo una importante evolución en las tecnologías y técnicas de imagen y sonido. Hoy los soportes analógicos, tales como la proyección de videos, películas, diapositivas y grabaciones de audio han desaparecido o están desapareciendo, dando paso a los nuevos soportes digitales (Asenjo, 2014, p.119).

Estos han visto reducidos los costes de su producción y se presenta además una mayor versatilidad al permitir la actualización de los contenidos de forma más fácil y ágil (Besolí, 2010, citado en Asenjo, 2014, p.119).

A medida que crece la cantidad y complejidad de los datos obtenidos, los métodos de análisis y de visualización son cada vez más sofisticados para ayudar a los investigadores a explorar y comprender la forma y la estructura del objeto o yacimiento digitalizado. Tal y como ocurre siempre que se emplea tecnología 3D, la técnica adoptada será determinada por los datos, el hardware y el software disponibles, así como por los objetivos buscados (Reilly & Rahtz, 2005, p.3).

Tras un reportaje publicado en los Estados Unidos por la Fundación Nacional de la Ciencia, la expresión “data visualization”, es decir, visualización de los datos, fue definida en 1987 como un concepto en evolución que hacía referencia a aquellas técnicas que permitían una interpretación visual de los datos a través de la representación, modelado y visualización de sólidos y animaciones. Estas visualizaciones implicaban el uso de procesadores de imagen y gráficos, así como visores de ordenador e interfaces. Más tarde, en 1994, Paul Miller y Julián Richards definían las visualizaciones en el marco arqueológico como la exploración computarizada de los datos obtenidos, que se habían convertido en objetos geométricos que podían visualizarse. La visualización es un proceso interactivo mediante el cual conjuntos de datos potencialmente grandes y complejos pueden aparecer en la pantalla del ordenador y ser explorados para revelar nuevas perspectivas (Miller & Richards, 1994, p.19).

A su vez, estos autores centraron su atención en las enormes ventajas que las visualizaciones conllevan para la arqueología (las cuales se consideran aplicables al resto de patrimonio), dado que valoran tienen un enorme potencial de investigación por las siguientes razones:

- Cuestiones muy visuales. Sus datos con frecuencia comprenden imágenes de los objetos o de los sitios, fotografías aéreas, diagramas de levantamiento geofísico, por satélite imágenes, o los planes de excavación.
- Los conjuntos de datos pueden ser muy grandes.
- Los datos pueden ser extremadamente complejos.

Por ello el ámbito del patrimonio cultural es un campo ideal para la aplicación de los datos 3D (Callieri, Ponchio, Cignoni & Scopigno, 2008, p.1) dado que, entre otras cosas, las visualizaciones constituyen una herramienta potencialmente poderosa a la hora de influir en un gran número de personas. Cuanta más visual y realista pueda ser la información, más interesa al público. Por un lado, permite a un gran número de personas acceder al pasado y, por otro lado, es una herramienta fundamental para los conservadores del patrimonio (Miller & Richards, 1994, p.21).

Reilly (1996, p.38) afirma que la visualización de datos se refiere a la práctica de explorar visualmente los datos que se han convertido en objetos geométricos visualizables y actualmente constituye un proceso interactivo en el que grandes y complejos conjuntos de datos se sitúan dentro del rango de la experiencia y la cognición humana, y donde se estimulan nuevas percepciones.

Por su parte, el trabajo de campo arqueológico, produce una gran cantidad de datos y archivos 3D que solo pueden ser analizados empleando dispositivos tales como ordenadores. Las técnicas de visualización de datos aumentan y se desarrollan continuamente, dado el volumen y la complejidad de los datos con los que los arqueólogos se ven obligados a trabajar (Reilly, 1989, p.569).

Por tanto, las imágenes del ordenador son muy valiosas para visualizar aquellos detalles topográficos que son difíciles o imposibles de ver en el suelo. También son indispensables para el análisis de sistemas de detección remota y geofísica. La superficie generada por un ordenador es, por supuesto, mucho más flexible que la rígida topografía física a la que representa. Por ello las técnicas digitales son capaces de mejorar la información que una fotografía o la realidad nos brinda, dado que pueden exagerar las lecturas, mejorando así la definición de las características de los objetos de estudio (Reilly, 1989, p.572).

Como ha podido ya observarse, Paul Reilly² es citado en numerosas ocasiones en este capítulo por constituir un referente en el ámbito de la arqueología digital y la

² Paul Reilly es licenciado en arqueología e historia por la Universidad de Leeds y realizó su doctorado en el Centro de Investigación de Arqueología Computacional de North Staffordshire Polytechnic. Ha trabajado en muchos proyectos de excavación arqueológica y de campo en Gran Bretaña y en otros lugares de Europa. De 1986 a 1989 fue investigador de investigación del Centro Científico de IBM UK Scientific Center y se convirtió en Investigador Científico en 1989. Actualmente continúa siendo investigador en el Archaeological Computing Research Group de la Universidad de Southampton. Cuenta con numerosas publicaciones, especialmente artículos relacionados con aplicaciones informáticas en investigación arqueológica.

visualización de datos. Reilly considera que, si se desea compartir el conocimiento fuera de los círculos de especialistas, el público en general debe ser capaz de comprender y apreciar la información que ofrece una visualización. Por ello se debe tener acceso a la educación y la formación necesarias para poder "leer" y comprender las visualizaciones (Reilly, 1996:39). Esto es fundamental puesto que, si las lecturas que realizan erróneamente, el mensaje que se quiere transmitir o no llega al destinatario, o bien llega malinterpretado.

Sin embargo, antes de los años 90, y muy especialmente del 2000, el acceso a los métodos de visualización se encontraba restringido porque, entre otras cosas, el hardware de visualización adecuado era relativamente raro y, por lo tanto, costoso.

No pueden dejar de mencionarse las infografías, que consisten en la producción por ordenador de objetos multimedia, es decir, artefactos de carácter digital que corresponden internamente a ficheros de ordenador y están pensados para ser observados a través de una pantalla o bien impresos en un papel. Las infografías pueden ser divididas en aquellas en las cuales quién los crea trabaja de un modo plano (imágenes bitmaps) y aquellas en las que desde su ejecución se trabaja directamente de un modo tridimensional (Gómez Robles, Quirosa y Fernández Ruiz, 2009, pp.10 y 11).

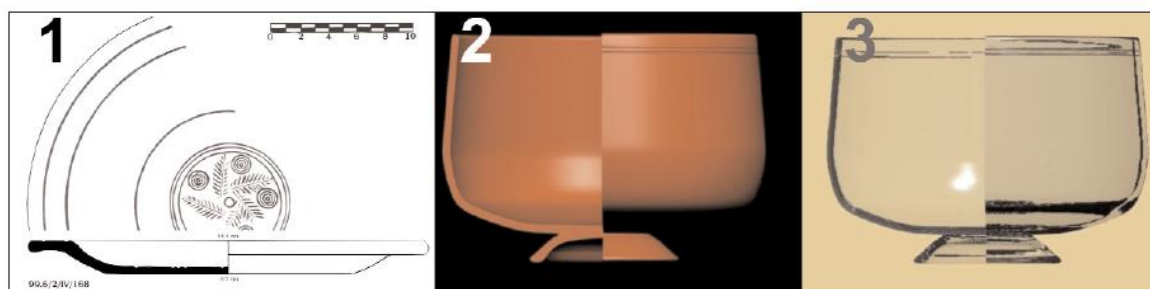


Fig. 264 Ejemplo de infografías: 1) dibujo tradicional plato sigillata; 2) modelo 3D textura *sigillata*; 3) modelo 3D textura vidrio. ©Francisco José López Fraile.

Constituyen el mejor medio para explicar de manera clara, visual y sintética una serie de conceptos, hechos o datos complejos. Por ello se presenta la infografía como una de las muchas opciones de lenguaje visual que puede comunicar de una manera más pedagógica y cercana (López Fraile, 2007, pp.437 y 443).

Los usuarios precisan de representaciones visuales, realistas y precisas que se incluyan en herramientas de navegación e interacción sencillas y en tiempo real por lo que

el diseño de las interfaces y el empleo general de estas herramientas de representación van a determinar la diferencia para que estas no sean simples “juguetes agradables” sino un instrumento técnico realmente útil (Callieri et al., 2008).

Con estas herramientas ha surgido la gran ventaja de que el usuario pueda emplear lupas para aumentar las obras, por lo que estos sistemas le permiten: seguir intereses específicos; escoger la ruta de exploración, centrándose en los detalles que personalmente más le interesan; y brindan, además, la posibilidad de escoger la duración del tiempo de la visualización en base a sus necesidades y objetivos específicos (Stanco & Tanasi, 2011, p.40).

La herramienta *Virtual Inspector* creada por el CNR (Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione Consiglio Nazionale delle Ricerche) es un sistema que permite visualizar modelos

3D. Uno de los principales objetivos que la iniciativa tenía era la de proporcionar al usuario una interacción sencilla y natural, basada en el acto directo de "apuntar y hacer clic". Sin embargo también se buscaba lograr máximos resultados empleando plataformas de bajo costo con diversas finalidades: asegurar una mayor comunidad de



Fig. 265 Interfaz de usuario de la herramienta, mostrando el modelo 3D de Arrigo VII. ©Marco Callieri, Federico Ponchio, Paolo Cignoni & Roberto Scopigno.

usuarios, mejorar la adaptabilidad al usuario con una interacción con los datos 3D tan fácil y natural como fuese posible, obtener un rendimiento interactivo de alta calidad en el que el usuario debía poder interactuar al navegar en los modelos 3D altamente densos sin sufrir degradación en el rendimiento o calidad de la prestación e integrar datos multimedia que brindasn informaciones útiles a especialistas. La herramienta fue diseñada para la visualización, principalmente, de obras de arte individuales, como esculturas, cerámicas,

arquitecturas, etc. Las primeras evaluaciones de 2001 y 2002 de la herramienta fueron muy alentadoras, puesto que los restauradores estaban fascinados por la posibilidad de inspeccionar tan fácilmente un modelo 3D tan denso y preciso y consideraron extremadamente útil sus posibilidades para monitorizar los bienes culturales (Callieri et al., 2008).

A continuación, se describe la investigación desarrollada por el equipo formado por Fabrizio Galeazzi, Paola Di Giuseppantonio y Justin L. Matthews, de las Universidades de York, Cambridge y California respectivamente (2015). Se realizaron dos experimentos con el fin de investigar cómo el modo de presentación de un objeto influye en su comprensión. En concreto, se estudió cómo interactúan, se entienden y se describen los objetos cuando se perciben de tres maneras diferentes: tocando los artefactos reales, mirando imágenes en 2D o interactuando con réplicas digitales 3D en una pantalla de ordenador. Este experimento estaba dirigido a valorar si, al aumentar la realidad de un objeto, es decir, al usar diferentes niveles de percepción de un artefacto a través de la reproducción digital, los estudiantes percibirían este artefacto de manera diferente.

Ciento quince estudiantes se ofrecieron voluntariamente a participar en el estudio. Todos eran hablantes competentes de inglés, tanto nativos como extranjeros que conocían la lengua inglesa y tenían valores normales o corregidos de visión.

En el experimento nº 1 los participantes fueron asignados aleatoriamente a dos grupos: el grupo 1 veía la imagen digital de una estatua, mientras que el grupo 2 una instantánea de la nube de puntos 3D de la misma estatua. La interacción con copias digitales de artefactos no fue parte de este experimento ya que los participantes sólo vieron las instantáneas e imágenes.

Por su parte, los participantes en el Experimento nº 2 se dividieron en tres grupos: los del grupo 1 interactuaron activamente con los artefactos originales, los del grupo 2 visualizaron imágenes de los artefactos y los participantes en el grupo 3 con réplicas 3D de los mismos. Los participantes en el grupo 3 podían interactuar con la visualización en 3D y también tenían la opción de ver los objetos con o sin colores, cambiando la textura y visualizando la malla, la nube de puntos y el modo alambre.

En ambos estudios, se pidió a los participantes que describieran los artefactos que veían en detalle. En el primer experimento, se obtuvieron descripciones a partir de conjuntos de preguntas autoguiadas, incluyendo una combinación de opción múltiple, escala de likert³ y preguntas abiertas. En el segundo experimento, se pidió a los participantes (estudiantes y profesionales en el campo de la arqueología) que describieran verbalmente objetos, solos, delante de una cámara de video.

Los resultados del Experimento 1 revelaron detalles sobre cómo las personas perciben los objetos a través de copias digitales y cómo enfrentan la ausencia de objetos auténticos en la vida real. En general, se concluyó que los conocimientos de fondo guiaban algunas de las respuestas de los estudiantes. Con respecto al uso de diferentes tipos de medios, grupo 2, los resultados muestran que en general, los estudiantes que visualizaron la nube de puntos 3D demostraron una mejor comprensión de detalles particulares y demostraron una comprensión más completa de la textura y la forma. Describieron el objeto, además, como pesado, incluso más pesado que lo que indicaron sus compañeros del grupo de imágenes 2D.

Un número significativo de participantes en el grupo que visualizaba e interactuaba con el objeto, subrayó la importancia de observar el objeto con o sin los colores originales puesto que aumenta la información de la textura, un detalle altamente asociado con la experiencia táctil.

Con respecto a la forma, tanto los estudiantes como los arqueólogos que visualizaron el modelo 3D mencionaron y describieron la forma del objeto más consistente que los otros participantes que vieron e incluso que tocaron la obra. Una vez entendían cómo funcionaba la herramienta de visualización e interacción, la posibilidad de eliminar los colores del modelo 3D era vista como una valiosa herramienta para percibir el objeto.

Así, los resultados de los experimentos concluyeron que las réplicas digitales 3D de artefactos constituyen los medios más efectivos para percibir de las características físicas de los mismos, permitiendo una experiencia más encarnada con estos objetos. Las

³ A diferencia de las preguntas dicotómicas con respuesta sí/no, la escala de Likert permite medir actitudes y conocer el grado de conformidad del encuestado con cualquier afirmación que se proponga. Es muy empleada en situaciones en las que se requiere que la persona matice su opinión. En este sentido, las categorías de respuesta servirán para capturar la intensidad de los sentimientos del encuestado hacia dicha afirmación (Netquest, 2014).

experiencias 3D en tiempo real que utilizan múltiples capas informativas (textura, malla, vértices, wireframe) simulan mejor que las imágenes en 2D las experiencias de la vida real, ya que la percepción de textura y superficie queda compensada con la falta de una experiencia táctil con el original.

La mayoría de los museos del mundo incluyen ya en su página web la posibilidad de observar sus obras desde casa a través de visualizaciones, ampliando y reduciendo la imagen para detenerse en los detalles que el usuario escoja. Como ejemplo, a continuación, se ilustra el cuadro *La fragua de Vulcano*, de Diego Rodríguez Velázquez da Silva, de 1630, visualizado desde la página Galería online del Museo del Prado (Museo Nacional del Prado, s.f. a).

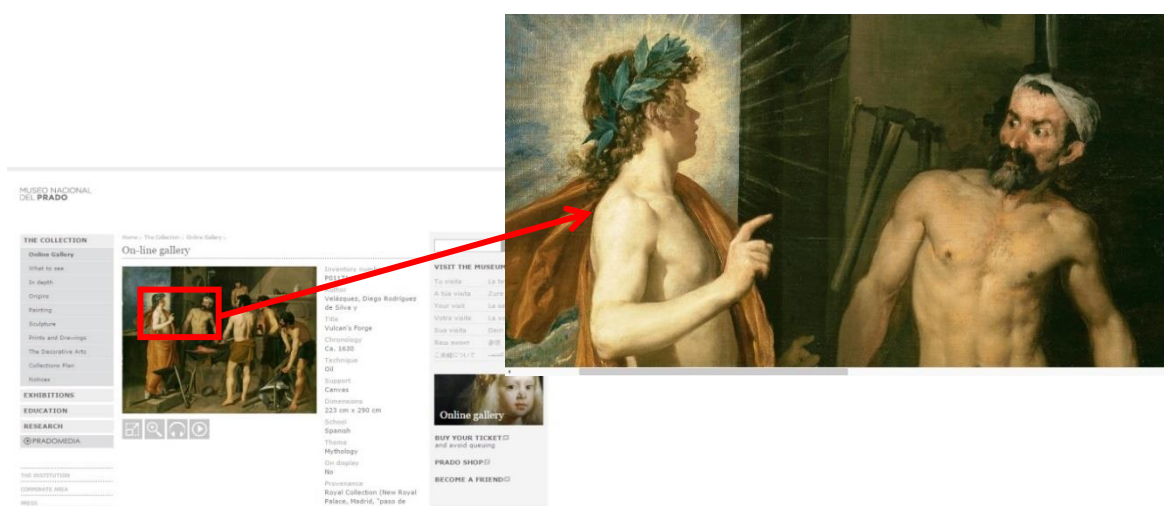


Fig. 266 Página del Museo del Prado donde puede observarse la obra *La fragua de vulcano*. La flecha señala un detalle del cuadro ampliado al máximo posible. ©Museo Nacional del Prado.

Como puede comprobarse, con los sistemas de zoom de las visualizaciones surge la posibilidad de observar datos cuya apreciación es imposible para el público, no solo en casos en los que la obra se encuentra inaccesible ya sea por la localización y falta de permisos, sino debido a que, aunque el visitante pueda acceder a ella, no es posible acercarse tanto a la misma, ni, mucho menos, observar la información 3D de su superficie. Por ello, este sistema de observación puede revelar a los investigadores numerosa información que no puede verse sin ayuda de otros instrumentos, y sobretodo, evita el inconveniente de tener que manipular la obra.

Otro ejemplo que debe ser citado es el Museo Arqueológico Nacional. La institución cuenta con una de las colecciones de cerámica griega más importantes del mundo y actualmente, además, con la primera colección de vasos griegos 3D en el mundo. Con la colaboración de Néstor F. Marqués, 30 piezas de la más alta calidad e importancia artística e histórica fueron seleccionadas y han sido virtualizadas con el fin de obtener modelos 3D precisos y detallados que se pueden disfrutar de forma libre y gratuita a través de la red (Marqués, s.f. a).

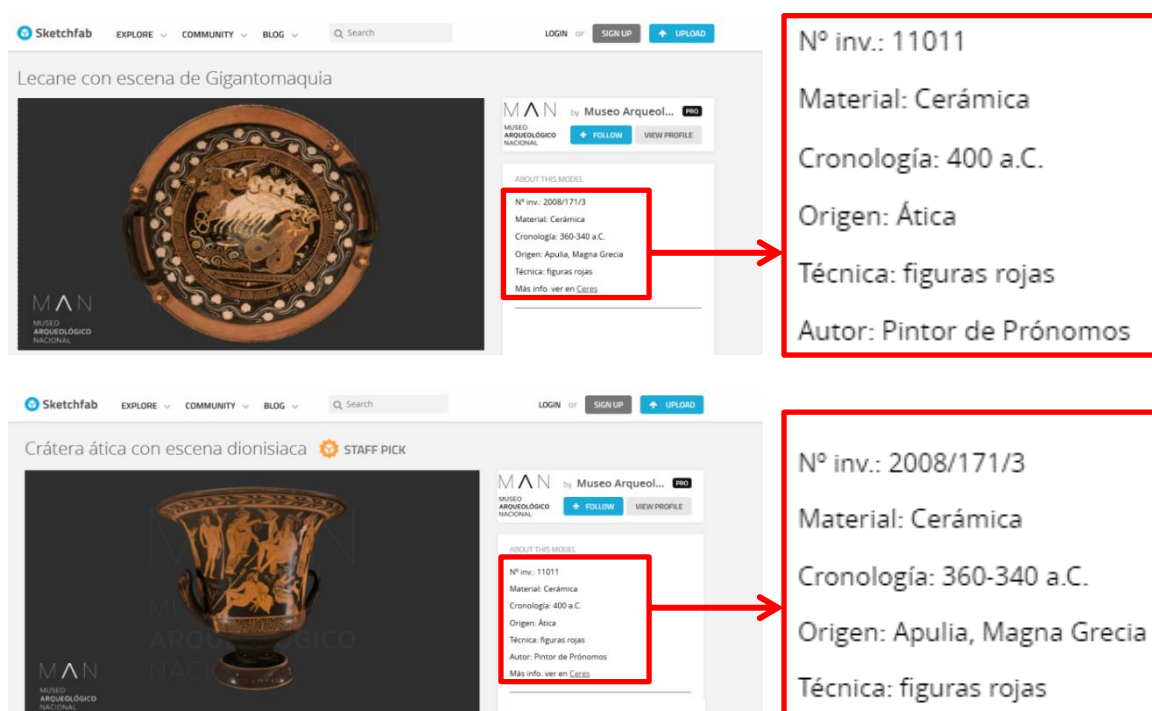


Fig. 267 Ambas imágenes muestran dos de las piezas digitalizadas para el MAN. Los cuadros rojos destacan, ampliadas, la información referente a las piezas, incluyendo: el número de inventario, el material constitutivo de la obra, la cronología, origen, técnica y el autor, en caso de ser conocido. ©Néstor F. Marqués / Museo Arqueológico.

Por su parte, en el ámbito del patrimonio se encuentra muy generalizado el uso de las recreaciones 3D. Estas constituyen animaciones, generalmente de reconstrucciones virtuales en las que se muestran monumentos, obras de arte o entornos (recuérdese el capítulo 5 referente a la restauración digital). Las recreaciones simulan cómo era el objeto de estudio en el pasado o bien cómo será en un futuro, de modo que el espectador puede hacerse una idea mucho más precisa de numerosa información que de otro modo no llegaría a visualizar. Tal y como ocurre con las numerosas herramientas desarrolladas a lo largo de este capítulo, las recreaciones 3D constituyen un gran apoyo a las tareas de divulgación y difusión.

Las videoproyecciones, citadas anteriormente en el capítulo 5, se incluyen de nuevo en este apartado al constituir otro modo de divulgar estas recreaciones. Tienen además una destacable utilidad en lo que a didáctica y difusión refiere, dado que ofrecen información sustancial adicional, tanto para especialistas como para público general. Al tratarse de fenómenos lumínicos muy visuales, la información y el mensaje emitido quedan siempre más claros y entendidos que si simplemente son leídos.

Por ello, como ejemplo práctico puede citarse el modelo digital que emula el interior del ábside central de la iglesia conventual de Santa María de Mave en Palencia. La iglesia conventual fue en 2009 digitalizada por completo y se tomó como modelo 3D el recorte de la zona sobre la cual iba a realizarse la videoproyección para aplicar esta técnica. En el edificio se recrearon con el máximo rigor histórico-artístico las cuatro etapas pictóricas (románico, gótico, renacimiento y barroco) que aisladamente pueden visitarse en algunos de los 54 templos que constituyen el “Románico Norte” (Martín, Llamas y Perán, 2013, pp.81- 85).



Fig. 268 Proyecciones que muestran la evolución de la policromía en el ábside central de la iglesia. ©Pedro Martín Leronés, José María Llamas Fernández y Jose Ramón Perán González.

En este caso, en el que pueden verse las diferentes fases por las que los templos han pasado, el visitante profundiza y comprende la historia de los mismos con mayor interés que si ha de leer cartelas o simplemente escuchar audioguías.

7. 2. 1 Pdf 3D y visores web

Otra de las herramientas más importantes para la difusión, divulgación e investigación, que mejora la visualización, comprensión y estudio de las obras, es la creación de un pdf 3D. Estos son archivos de extensión .pdf que permiten abrir, visualizar y mover interactivamente modelos 3D. Estos archivos posibilitan la publicación de información tridimensional, por lo que un gran número de personas pueden visualizarla a través de internet, haciendo accesible el resultado de la aplicación de las nuevas tecnologías en el patrimonio sin costes para el usuario final. Los pdf 3D pueden abrirse con el programa gratuito Adobe Reader. Si bien es cierto que existen versiones profesionales de pago con las que se amplían sensiblemente sus funciones (tales como medir y acotar las piezas), con la versión clásica puede realizarse la función más importante: navegar por todo el modelo (Mañana-Borrazás, 2014, p.1).

La capacidad de incorporar modelos 3D en documentos .pdf está disponible desde la versión 7 de Adobe Reader, es decir, desde enero de 2005. A pesar de la existencia de museos que emplean este tipo de archivos para mostrar sus modelos 3D, como el Museo Virtual de Hampson⁴ y el Museo Virtual Amarna⁵ (Felicísimo, Polo y Peris, 2013, p.14) estos no se ha extendido aún lo suficiente en el ámbito del patrimonio cultural y continúan siendo muy desconocidos por gran parte de los profesionales del patrimonio.

Al abrir el modelo en pdf 3D, este aparece en vista previa como una imagen bidimensional; sin embargo, al hacer clic en el modelo 3D, se habilita su navegación. Estos pdf son muy útiles para proyectos que quieren ser divulgados, complementando al resto de documentación relevante; para estudiantes que se encuentran investigando o bien para compartir entre profesionales.

Los visores 3D web, por su parte, presentan posibilidades muy similares a los pdf 3D, sin embargo, constituyen aplicaciones online que permiten subir el modelo 3D a internet por lo que las capacidades de estas herramientas son muy amplias. Una vez el modelo se encuentra on-line, se posibilita la observación de su geometría y toda la

⁴ <http://hampson.cast.uark.edu>

⁵ <http://amarna.cast.uark.edu>

información tridimensional que se encuentra en ella. Esta herramienta es muy empleada en la difusión del patrimonio en páginas webs de todo tipo, desde museos, a empresas privadas, blogs, universidades, etc., puesto que de un modo sencillo e intuitivo se puede navegar a través del modelo desde internet, generalmente sin necesidad de descargar programa alguno en el ordenador del usuario.

Debe en este punto presentarse al lector el proyecto iniciado recientemente *World Wonders* del Instituto Cultural de Google. Para representar estas maravillas del mundo el mayor número de monumentos y lugares históricos digitalizados se encuentran en España, Francia e Italia. La iniciativa ha partido, por tanto, de una división de Google cuya dirección asumió el historiador e informático, Steve Crossan. El proyecto no aporta imágenes totalmente novedosas o nunca antes visualizadas en Google, sino que da a las que ya existían un enfoque didáctico y añade además contexto cultural para su mejor comprensión. Recordando Google Street View, los mapas a pie de calle de Google son ya comunes; sin embargo, gracias a este proyecto, las ruinas de Pompeya o la catedral de Colonia se muestran ahora con la combinación de contenido presente en otros organismos asociados al proyecto: la Unesco, la organización británica de fondo de monumentos y la agencia fotográfica Getty Images.

En este caso se añaden, en el lateral derecho, vídeos de cada lugar que Google ha considerado interesante y fotografías de los propios visitantes que han etiquetado con Panoramio, un servicio creado en España y que posteriormente adquirió el gigante californiano. El proceso de digitalización de los mapas a pie de calle es el mismo que el llevado a cabo con Street View; sin embargo, para el acceso a los monumentos era en ocasiones cuanto menos, complicado. Luc Vincent, ingeniero director de Street View, explicó cómo en 2006 comenzaron a fotografiar las calles con furgonetas, en 2007 y 2008 llegaron a los coches, con mejor cámara y un GPS más preciso, y en 2010 se dio el gran paso con la cuarta generación, con un conjunto de 15 cámaras colocadas sobre los coches, simulando un balón de fútbol. Sin embargo, hasta que no llegaron las bicicletas no fue posible añadir lugares de más difícil acceso. Por ejemplo, según Google, el acceso es el mayor impedimento para que *La Alhambra* de Granada no se encuentre entre los monumentos digitalizados. Las máquinas con las que hoy en día se cuenta no llegan a determinados lugares, aunque lógicamente la situación pronto cambiará. Respecto a la elección de *The World Wonders*, faltan, por ejemplo, *La Sagrada Familia* de Barcelona o

el madrileño Museo del Prado y el Louvre de París. Sí que se encuentran en cambio los centros históricos de Mérida, Tarragona, Córdoba, Toledo, Cuenca, Salamanca, Ávila, Cáceres, Santiago de Compostela, Segovia, Lugo y San Cristóbal de la Laguna, es decir, doce maravillas españolas frente a las tres de Australia. En Estados Unidos abundan los parques nacionales y México cuenta con 12 lugares espaciales, no tanto monumentos, pero sí entornos que destacan en conjunto, como el centro histórico de la propia capital, Zacatecas, Puebla, Morelia y Guanajuato (Oi2, s.f.).

Realmente, de momento en el proyecto no se emplea la tecnología 3D, si no fotografías 360° de muy buena calidad, sin embargo, dado que el usuario puede moverse por el escenario a voluntad propia, explorando cada detalle, acercándose y alejándose según convenga, es una iniciativa que se considera destacable, por su positiva implicación en la difusión del patrimonio.

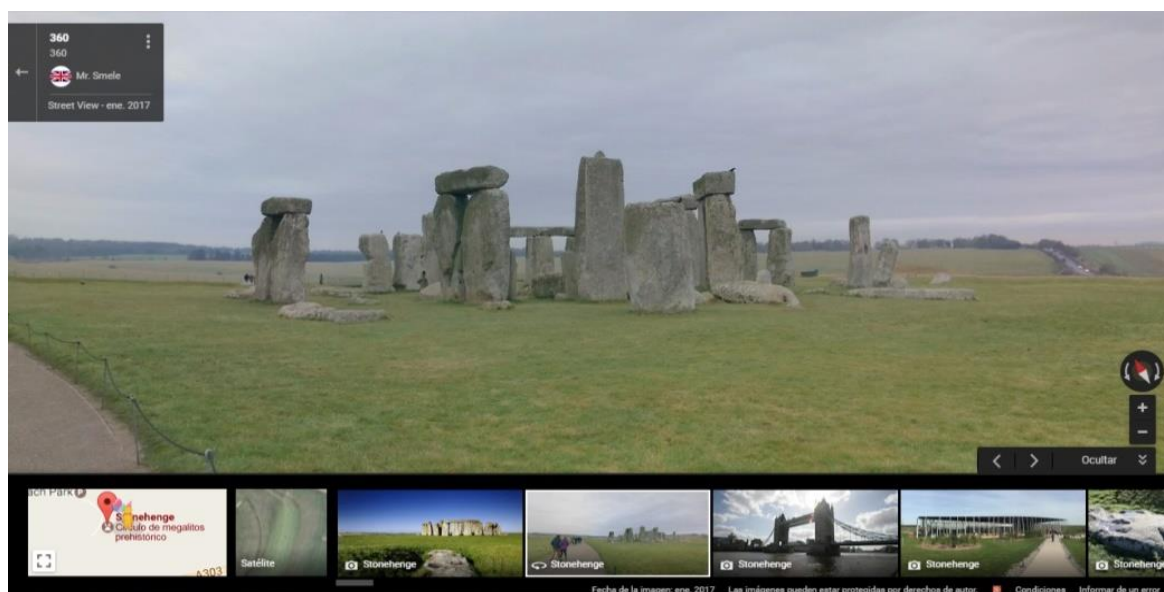


Fig. 269 En la imagen puede observarse el monumento megalítico de *Stonehenge*, de Reino Unido. La imagen fue subida por un usuario en enero de 2017. Se puede navegar por ella en 360° y ampliar o alejar la imagen cuanto se desee. ©Smele / Google Maps.

También Google ha lanzado una nueva aplicación, *Google Eart*, desarrollada para explorar el mundo desde el ordenador o dispositivos móviles. El programa ofrece mapas de cualquier ubicación del planeta y representaciones tridimensionales de miles de puntos de interés: edificios, museos, lugares históricos, escenarios naturales, etc, acompañado además de abundante contenido didáctico.

Numerosas son las opciones que brinda el programa, destacándose por encima de otras en esta tesis, la visualización de edificios 3D que permite ver modelos de edificios, monumentos, fuentes, puentes, torres, etc. Al hacer clic en un edificio 3D, se abre un globo con más información sobre el lugar. Los modelos 3D de *Google Earth* han sido creados por usuarios de todo el mundo y cualquier persona puede añadir nuevos (Google Earth, s.f.).

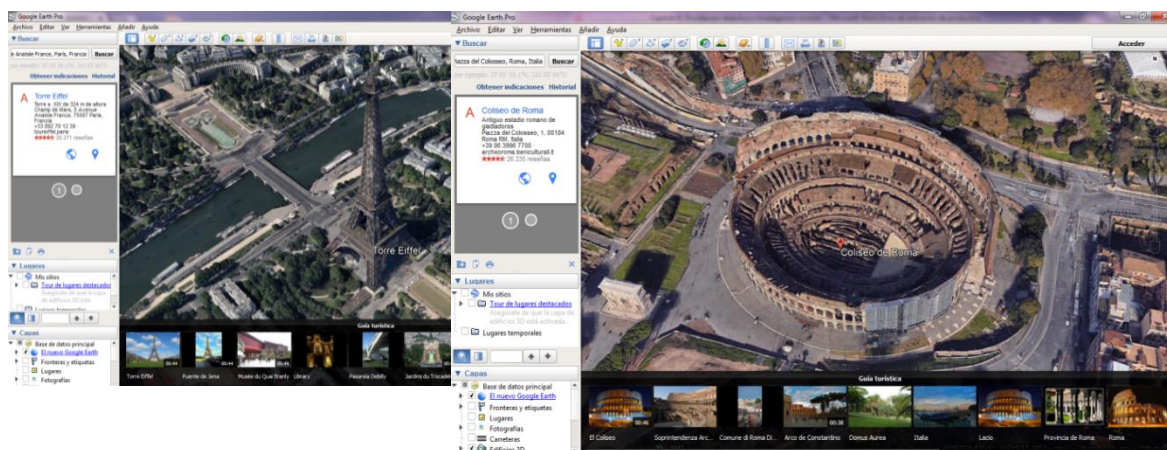


Fig. 270 Modelos 3D visualizados a partir del programa Google Earth. A la izquierda aparece la *Torre Eiffel* de París y a la derecha el *Coliseo* de Roma. ©María Ávila Rodríguez.

7. 2. 2 Realidad virtual

La Realidad Virtual, RV de ahora en adelante, constituye, tras internet, la segunda revolución tecnológica más importante y es, de las actuales herramientas informáticas, la que ha irrumpido con más fuerza (Grande, 2012, p.8; Pérez Martínez, 2011, p.4).

A finales de los 80 los gráficos generados por computador experimentaron un importante desarrollo que repercutió en que las imágenes tridimensionales comenzaran a reemplazar a las bidimensionales. Comienza a surgir entonces la necesidad de un espacio de trabajo que sea totalmente interactivo, siendo en 1989 cuando Jaron Lanier propone el término Realidad Virtual (Hilera, Otón y Martínez, 1999): una base de datos gráficas en los que se puede interactuar, que son explorables y que pueden ser visualizados. Todo ello, además, generalmente ocurre en tiempo real y en forma de imágenes tridimensionales por lo que provoca una sensación de invasión en la imagen (Queau, 1995, citado en Grande,

2012, p.8). De este modo, se entiende por RV aquellos sistemas o interfaces informáticos que generan entornos sintéticos tridimensionales y representan algún aspecto del mundo real o ficticio a través de medios electrónicos o de la realidad. En ellos, el usuario tiene la sensación de pertenecer a dicho ambiente (Queau, 1995, citado en Grande, 2012, pp.8 y 9).

La RV tiene como objetivo la creación de una experiencia que haga sentir al usuario que se encuentra inmerso en el mundo virtual, aparentemente real; para ello, emplea gráficos 3D, sonidos que envuelven las escenas mostradas e infinidad de recursos. La RV utiliza la visión de un observador que es el usuario y éste se mueve dentro del mundo virtual utilizando dispositivos adecuados, como gafas o guantes electrónicos, o el simple ratón del ordenador. Para conseguirlo, explota todas las técnicas de reproducción de imágenes conocidas hasta el momento, empleándolas en el entorno generado tecnológicamente, en el que el usuario puede examinar, manipular e interactuar. El mundo virtual es un modelo matemático que describe un espacio tridimensional dentro del cual están contenidos objetos (Hilera, Otón y Martínez J. 1999); en otras palabras, permite al usuario navegar e interactuar, siempre en tiempo real, por medio de la simulación gráfica 3D generada por ordenador.

La percepción en 3D de entornos simulados permite envolver al usuario en diferentes mundos y realidades, mostrándoles en numerosas ocasiones como era el pasado, pero también el presente y el futuro. Por ello, las 3 características fundamentales (Pérez Martínez, 2011, p.8) que diferencian la RV del resto de animaciones 3D tradicionales son: la posibilidad de tiempo real, de una inmersión completa por el interior del escenario y la interacción con los elementos que lo conforman.

Las capacidades de tiempo real y la interactividad son dos características que están estrechamente relacionadas entre sí y permiten que la realidad virtual se diferencie de las fotografías 360°. En estas últimas existe el tiempo real pero no la posibilidad de interactuar.

La RV puede apoyarse en diferentes herramientas para aumentar la inmersión de los usuarios; tal es el caso del empleo de cascos o diferentes dispositivos con visión estereoscópica, audífonos, guantes e incluso trajes como medio para interactuar en un ambiente virtual. Estos elementos permiten al computador conocer las intervenciones y actuaciones del usuario. Cuando actúan como dispositivos de salida, pueden utilizarse

incluso para dar al usuario la sensación de estar sosteniendo un objeto que se ha cogido dentro del ambiente virtual (Hilera et al., 1999).

Ejemplo de los dispositivos empleados en RV son los cascos de Samsung, HTC o Sony, los Cardboard de Google o el Oculus Rift de Facebook, además de los paseos virtuales de la NASA en Marte e incluso la pornografía en realidad virtual (Bbc, 2016).



Fig. 271 Diferentes dispositivos de RV: a) Samsung Gear VR. ©Samsung; b) Virtual Playstation VR de Sony. ©Play Station VR; c) Oculus Rift de Facebook. ©Oculus Rift.

Los visores Cardboard de Google son más sencillos que estos anteriores, fáciles de adquirir y muy económicos. Una vez se obtiene uno, basta con montarlo y observar en el interior para ver aplicaciones y videos específicos en 3D. Existe una amplia gama de estos visores que cada vez son más populares. Actualmente el más barato del mercado es el modelo Knox V2, que cuesta solamente 6,30€ y el más caro el Pocket-VR with CandyShell Grip, que cuesta 62,26€.



Fig. 272 A la izquierda pueden verse 3 modelos diferentes de Cardboard y a la derecha las instrucciones de montaje de uno de ellos. En la imagen puede verse tal y como se adquiere el producto desmontado por piezas. ©VR Google.

7. 2. 2. 1 Lenguaje de modelado de realidad virtual

Por su parte, el lenguaje de modelado de realidad virtual, conocido por las siglas VRML (Virtual Reality Modeling Language) se emplea para diseñar objetos 3D, escenas 3D y realidades virtuales a las que se accede mediante ordenadores convencionales con una conexión a internet.

Los archivos VRML se almacenan en la extensión .wrl y son archivos 3D (Geater, s.f.). Estos describen un modelo virtual que puede ser observado interactivamente mediante el uso de aplicaciones plug-in VRML disponibles en todos los navegadores web (Cromby, Standen & Brown, 1995, citados en Jung, s.f., p.54), por lo que esta tecnología es cada vez más accesible para el usuario medio, quién puede así disponer de mejores equipos multimedia a precios asequibles (Hilera et al., 1999).

El VRML fue creado en 1994 por Mark Pesce, Anthony Parisi, y Gavin Bell, quienes se encargaron de diseñar las especificaciones para el primer lenguaje de modelado 3D (Johnson, Moher, Ohlsson & Gillingham, 1999, citados en Jung, s.f., p.55).

Tras la definición de la primera versión, que generaba mundos estáticos, pronto fue necesaria su actualización para conseguir que los objetos tuviesen comportamientos propios y que el usuario pudiese interactuar con ellos. Por ello, en 1996 fue lanzada la segunda versión, mucho más compleja que su predecesora: se posibilitó la especificación de comportamientos para los objetos y la interacción con el usuario mediante la definición de una serie de sensores de posición, de contacto, de colisión, etc. De este modo, la información registrada por dichos sensores era enviada a los diferentes objetos integrados en el mundo virtual, que actuarían en consecuencia. Por último, la descripción de las escenas se amplió notablemente, posibilitando efectos de fondo, sonidos tridimensionales, niebla, etc. (Hilera et al., 1999).

Las realidades virtuales tienen numerosas aplicaciones y cada vez es más frecuente su uso en diferentes campos y para variadas disciplinas, tales como: la educación, gestión, telecomunicaciones, juegos, entrenamiento militar, procesos industriales, medicina, trabajo a distancia, consulta de información, marketing, turismo, telerrobótica, etc (Hilera et al., 1999)...

Dada la relativa novedad de la realidad virtual, aún no se ha investigado lo suficiente sobre su eficacia didáctica, puesto que la mayoría de los estudios se centran en aspectos técnicos del diseño (Jung, s.f., p.56). Sin embargo, sí se ha comprobado que esta tiene importantes aplicaciones en la educación y que estimula el proceso de aprendizaje que se ve favorecido al emplear estas tecnologías. Esto se debe a que los alumnos aprenden más rápido y asimilan la información de una manera más consistente que empleando los métodos y herramientas tradicionales al aplicar todos los sentidos.

De este modo, puede observarse que la aparición del lenguaje VRML da lugar a que estas aplicaciones sean asequibles a cualquier persona que posea simplemente un ordenador y un navegador de internet, siendo su principal ventaja la gran capacidad de divulgación y de integración que posee con el resto de recursos web. Por ello, si además se añade su facilidad de visualización y de desarrollo, el lenguaje se convierte en una herramienta fundamental para la transmisión de conocimiento y, por lo tanto, con grandes posibilidades en el ámbito de la enseñanza (Hilera et al., 1999).

7. 2. 2. 2 Realidad aumentada

La realidad aumentada, de ahora en adelante RA, es una tecnología que posibilita la visualización del objeto mediante la superposición instantánea de imágenes, marcadores o información generados virtualmente sobre imágenes del mundo real. A través de un ordenador, un móvil, una PDA⁶, tabletas, etc., es posible ver gráficos en 3D que se despliegan por medio de códigos o 'marcas' programados por ordenador.

Su aplicación a la formación y el aprendizaje es de gran ayuda para el estudiante y el profesorado, puesto que pueden solaparse las virtudes del libro didáctico con la información añadida que aporta la virtualidad de sus contenidos.

⁶ Es decir, las nuevas agendas electrónicas que son conocidas como PDAs (Personal digital assistant, asistente digital personal).

Todo ello puede trasladarse a la didáctica para el ámbito de la restauración o la difusión en instituciones y museos, dado que el usuario se ve inmerso en la representación virtual de los contenidos que está leyendo y viendo en 3D (Augmented Reality Books, s.f.).

La visión del usuario sobre el mundo se realza o se aumenta con la información adicional generada por los modelos.

Así, a la realidad existente se le incorporan elementos adicionales y se incorporan otras informaciones útiles y/o necesarias. La diferencia con la Realidad Virtual radica en que, en esta, todo lo que se observa es virtual, no existe nada real. Como ya se ha comentado en el apartado anterior, suelen emplearse gafas y sistemas donde no es posible apreciar la realidad existente (Visuarteck, s.f.).

El director ejecutivo de Apple, Tim Cook afirma en una entrevista con la cadena estadounidense ABC News, realizada en 2016, que la RA abarca más que la realidad virtual al permitir que el usuario se encuentre presente. Mediante la RV se puede ver, crear y hacer todo lo que se desee, pero siempre se asienta sobre un mundo de fantasía; por su parte, la RA se encarga de agregar elementos virtuales a una realidad existente, no crea una nueva desde cero. Cook insiste en que la clave de la realidad virtual es aislar al individuo en un mundo artificial, mientras que la realidad aumentada permite disfrutar de las ventajas del mundo virtual sin perder la conexión con el mundo real. También existen dispositivos para emplear en RA, por ejemplo, las gafas HoloLens de Microsoft. Con ellas, el usuario puede "tocar" los objetos, hologramas generados por el ordenador, que se encuentren dentro de su campo visual. Google también creó su prototipo de gafas de realidad aumentada, Google Glass, aunque no tuvo el éxito esperado. En cuanto a Apple, la compañía ha contratado recientemente a dos ingenieros de Oculus (RV) y Magic Leap (RA), por lo que es muy probable surjan nuevos dispositivos y aplicaciones (Bbc, 2016).

Por ello, se puede afirmar que la principal diferencia entre RA y RV radica el grado de inmersión del sistema. La RV tiene como objetivos la inmersión total del usuario reemplazando completamente el mundo real en el que este vive mientras que, empleando la tecnología de RA, los usuarios pueden interactuar con el mundo virtual y real, mezclados de manera “natural”.

Un proyecto de realidad aumentada que fue pionero a principios del año 2000 es *Archeoguide*, que constituye el referente más destacado en cuanto a la aplicación de la tecnología de Realidad Aumentada al campo patrimonial, concretamente al arqueológico.

Iniciativa de la Unión Europea, participaron varias instituciones y empresas privadas financiadoras junto con el Ministerio de Cultura Griego. Los resultados obtenidos durante los primeros años del 2000 han tenido una gran trascendencia en el mundo académico a nivel internacional, siendo referente en la utilización de la tecnología de Realidad Aumentada para sitios arqueológicos (Ruiz Torres, 2011, p.4).

El proyecto *Archeoguide, Augmented Reality-Based Cultural Heritage On-Site Guide* surge como investigación que buscaba la exploración y puesta en práctica de las posibilidades que la tecnología de Realidad Aumentada brindaba en el campo del patrimonio cultural. Para ello, como escenario donde realizar esta experiencia, se eligió el sitio arqueológico de *Olimpia* en Grecia, donde se realizaron los estudios prácticos y demostrativos, junto con la evaluación por usuarios reales (Ruiz Torres, 2011, p.4). El prototipo fue allí instalado, dada la importancia del sitio al tratarse del lugar de nacimiento de los antiguos Juegos Olímpicos, contar con una alta popularidad entre los visitantes y el hecho de que se encuentra principalmente en ruinas (Vlahakis et al., 2002, p.52).

El proyecto fue desarrollado para demostrar que con sistemas móviles bien diseñados es posible aunar los conceptos de recreación, educación e investigaciones científicas. La guía electrónica personalizada diseñada ayuda a los usuarios a navegar y aprovechar al máximo su visita en sitios arqueológicos al aire libre. El sistema explotaba los entonces recientes avances en computación móvil, realidad aumentada y visualización 3D (Vlahakis et al., 2002, p.52), mediante el uso de dispositivos portátiles tales como un ordenador portátil, una tableta o una PDA. Una de las principales aplicaciones posibilitaba ver la reconstrucción virtual en 3D sobre las mismas ruinas de los edificios, junto a información adicional de audio y texto. De este modo, el usuario entendía el estado del edificio en la época de los antiguos Juegos Olímpicos, a la vez que observaba la correspondencia con los restos arqueológicos actualmente conservados y existentes. Las aplicaciones de Realidad Aumentada se pusieron en práctica sobre cuatro de los edificios más importantes: el *Templo de Hera*, el de *Zeus*, el *Philippeion* y el *Stadium*. Además de las reconstrucciones virtuales de los edificios, se insertaron avatares humanos en el espacio en ruinas del *Stadium* con el fin de recrear de forma realista el uso para el que estaba destinado el lugar (Vlahakis et al., 2001; Vlahakis et al., 2002, citados en Ruiz Torres, 2011, p.4).

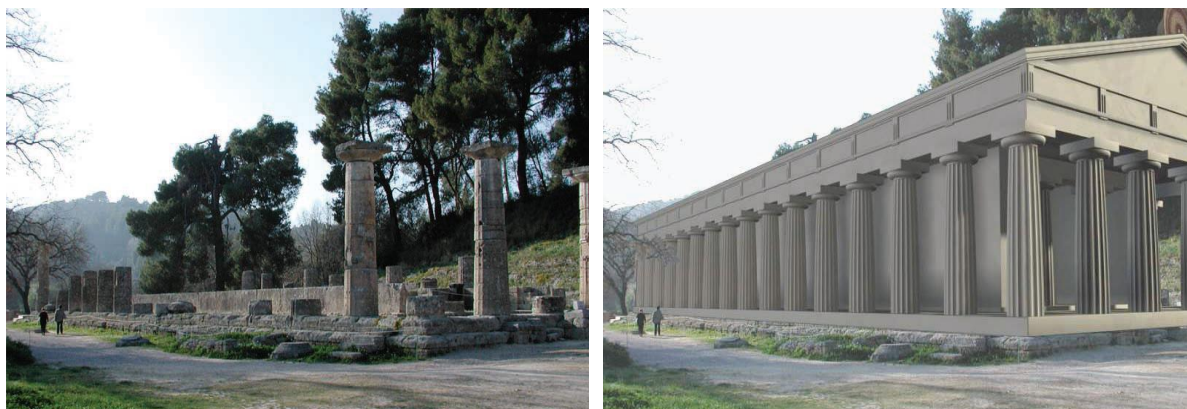


Fig. 273 Ruinas del *Templo de Hera*: A la izquierda el estado de conservación actual del templo y su derecha imagen de la realidad aumentada con la reconstrucción virtual del templo. ©Archeoguide.

Por su parte, más reciente es el proyecto llevado a cabo en España en el que una recreación digital permitirá ver, empleando un telescopio de realidad virtual, cómo era el teatro y otros edificios emblemáticos de la cara norte de la ciudad romana ubicada en el municipio de Saelices. La dirección del Parque Arqueológico de Segóbriga está desarrollando este equipo de realidad aumentada mediante el cual el usuario verá a través del telescopio, superponiendo sobre la imagen real de las actuales ruinas del parque, la imagen recreada de cómo pudo ser en su día ese espacio.

El telescopio está ya instalado en un punto intermedio entre el teatro y el anfiteatro, los edificios más espectaculares de Segóbriga. Desde allí podrán observarse otros edificios como los talleres, la necrópolis, las vías de acceso a la ciudad, el circo, el teatro y el anfiteatro (La Túnica de Neso, 2017).

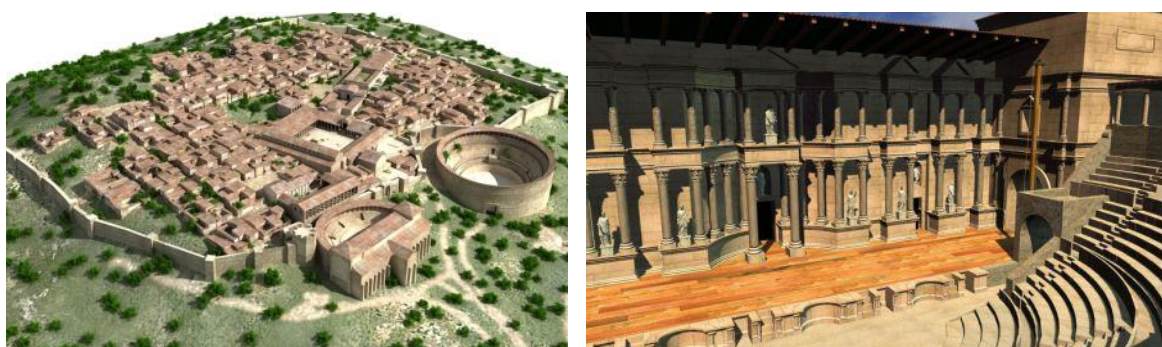


Fig. 274 A la izquierda aparece la recreación de la ciudad completa de Segóbriga y a la derecha la hipótesis de cómo pudo ser el teatro romano. ©Balawat.

7. 2. 2. 3 Arqueología virtual

Como puede verse, los ordenadores constituyen un elemento crucial de las tecnologías de la información⁷ contemporánea, de ahora en adelante TI. Las TI han convivido con el ser humano a lo largo del s. XX y resultaron ser tan influyentes para la arqueología moderna como lo fue la imprenta en el s. XV para la erudición y la ciencia. Dado el aparentemente potencial ilimitado que las tecnologías de la información presentan, los arqueólogos se han sentido atraídos por las mismas desde sus inicios. Su importancia probablemente reside en el hecho de que facilita y abarata la difusión de la información arqueológica tradicional (Reilly & Rahtz, 2005, p.1).

La evolución exponencial de estas tecnologías ha afectado profundamente a la arqueología como disciplina. La tecnología ha constituido siempre una parte importante en todas las prácticas arqueológicas, y su utilización ha contribuido al desarrollo de métodos y teorías para la investigación y análisis de sitios arqueológicos (Dell Unto, 2014, p.151). Por ello, con los avances en los gráficos de los ordenadores han ido surgiendo numerosas herramientas muy útiles a la hora de manipular los datos y la información recogida y registrada por los arqueólogos. Con estas potentes herramientas es hoy posible visualizar y reconstruir una pieza o sitio arqueológico (Monteiro, P. s.f.).

Sin embargo, en un principio, la visualización de los datos arqueológicos se limitaba a los dibujos en 2D que constituían simples renderizados artísticos (Simmons, 1996, citado en De Gross & Lewin, 1996, p.255). Las primeras aplicaciones de los ordenadores en la arqueología se centraban en la obtención de bases de datos, el procesado de las imágenes, modelado de objetos y análisis estadísticos (Oikawa, 1992, citado en De Gross & Lewin, 1996, p.255).

De este modo, los especialistas y amantes de la arqueología informatizada comenzaron en los años 70 a celebrar reuniones periódicas en Gran Bretaña. La conferencia anual denominada *Aplicaciones Informáticas y Métodos Cuantitativos en Arqueología* y comúnmente conocida como CAA⁸ surgió a partir de un pequeño club de

⁷ Se trata de la tecnología necesaria para adquirir, almacenar, procesar y distribuir información por medios electrónicos.

⁸ CAA es hoy una organización internacional que reúne a arqueólogos, matemáticos e informáticos. Sus objetivos son fomentar la comunicación entre estas disciplinas para proporcionar una encuesta sobre el trabajo actual sobre el terreno y estimular la discusión y el progreso futuro (Caa, s.f.).

británicos académicos y unos cuantos compañeros del resto de Europa. Actualmente es un encuentro internacional único que atrae a arqueólogos de todas partes del mundo (Reilly & Rahtz, 2005, p.1).

Así, los avances en la tecnología informática, especialmente las imágenes en 3D y las realidades virtuales, obligaron a los arqueólogos a reformular el modo en que visualizaban su material. Estos avances también tuvieron implicaciones radicales en el modo en que la arqueología sería conducida, enseñada y presentada en su futuro (Reilly, 1996, p.38).

De hecho, el Instituto de Arqueólogos, IFA⁹, consideraba ya en 1985, que era importante que los arqueólogos estuviesen debidamente entrenados en el uso de los ordenadores, animándoles a que realizasen los cursos adecuados y que los recursos informáticos se desarrollasen (Cooper & Richards, 1985, citados en Reilly & Rahtz, 2005, p.1).

El nacimiento de la arqueología virtual no solo fue consecuencia de la proliferación de las técnicas de modelado 3D, sino que también surgió por la necesidad de experimentar nuevos sistemas que consiguiesen almacenar una cantidad excesiva de datos, así como la creación del mejor medio para comunicarlos a través de un lenguaje visual (Stanco & Tanasi, 2011, p.2).

Actualmente, el término Arqueología Virtual es asociado con el uso de imágenes 3D o bien con imágenes de datos geofísicos de investigaciones arqueológicas (Reilly, 2015, p.12) y realmente, el concepto “Virtual Archeology¹⁰”, es definido como “el conjunto de técnicas informáticas que permiten la visualización 3D de la representación virtual y realista de los objetos y edificios antiguos, cuyos restos han desaparecido o están en un estado de preservación tan deficiente que hacen imposible su observación o muy difícil su interpretación” (Sánchez Climent y Cerdeño, 2014, p.21). La arqueología virtual, rápidamente se enfatizó en los gráficos, algo que no es sorprendente puesto que en las décadas de los 90 y del 2000 se registraron, como se ha indicado anteriormente, rápidos progresos en esta área, acompañados por la caída de los costos de la tecnología (Beale & Reilly, 2014, p.124). La aplicación de las reconstrucciones virtuales 3D a la arqueología se

⁹ Actualmente el grupo aparece como ClfA, Chartered Institute for Archaeologists, y es el principal cuerpo profesional que representa a arqueólogos que trabajan en el Reino Unido y en el extranjero (Cifa, n.d).

¹⁰ Numerosas son las publicaciones que nombran a Paul Reilly como el primero en fijar el concepto en 1990.

convirtió en el área principal de estudio en la arqueología virtual (Stanco & Tanasi, 2011, p.2), de modo que hoy esta disciplina es conocida por las visualizaciones 3D.

El concepto de arqueología virtual fue, y continúa siendo, útil para enfatizar la intersección entre la tecnología y la práctica arqueológica. Describe de este modo cambios intrínsecos dado que depende de la tecnología del momento y de su utilidad potencial en una situación específica. Por lo tanto, era natural que los primeros documentos que usaban el término “arqueología virtual” se refirieran frecuentemente a las aplicaciones de la informática 3D, las bases de datos y el hipertexto¹¹ (Beale & Reilly, 2014, pp.124 y 125).

Otro importante concepto a definir es la “Hipótesis Virtual”, definida como el conjunto de afirmaciones de carácter hipotético que determinan la propuesta virtual, total, parcial o fragmentalmente de un bien del patrimonio arqueológico, en un espacio y tiempo determinado. Por tanto, no se asegura la veracidad, si no que se consigue definir una imagen virtual a partir de cómo se cree que fue y no de cómo es en la actualidad. Ofrece a los arqueólogos la posibilidad de llevar a la realidad sus hipótesis reconstructivas, definir espacios y solucionar volúmenes, por lo que facilita la resolución de los problemas espaciales en los planteamientos (Grande, 2012, p.13).

El término fue originalmente destinado a describir un enfoque multidimensional para el modelado de las estructuras físicas y los trabajos de campo arqueológicos. El concepto describía algunas maneras en que la tecnología podría ser aprovechada para lograr nuevas formas de experimentación, documentación, interpretación y anotación de materiales y procesos arqueológicos primarios. Como se ha ido comentando en los apartados anteriores, la arqueología virtual no tuvo el impacto esperado (Beale & Reilly, 2014, p.124), dado que hasta hace relativamente poco tiempo la aplicación y el desarrollo de visualizaciones y métodos de reconstrucción virtuales en arqueología se reducía a un pequeño grupo de investigadores con acceso a los sistemas de investigación, que a menudo requerían una considerable experiencia y formación en dichos sistemas. Las restricciones de disponibilidad, acceso, facilidad de uso, etc. son ahora superadas por los avanzados

¹¹ Se dice que son hipertextos las páginas web, las enciclopedias en CD-ROM y algunos programas muy difundidos. De este modo se conoce como hipertextos tanto las herramientas que permiten crear y gestionar documentos hipertextuales, como los documentos concretos creados con dichas herramientas (Lamarca, s.f.).

sistemas informáticos que cuentan con una sofisticada funcionalidad e interfaces fáciles de usar (Reilly, 1996, p.38).

Así, dado que los datos arqueológicos representados en 3D pueden mostrar la apariencia original del sitio o lugar de estudio con aumentada precisión, calidad y realismo, no es de extrañar que la arqueología virtual sea cada vez más común y empleada por parte de arqueólogos e investigadores.

Todas estas aplicaciones favorecen notablemente la difusión del patrimonio arqueológico de un modo didáctico, captando el interés del público, despertando su curiosidad y motivando el deseo de conocer el patrimonio (Martínez Usó y Cabrera, 2014, p.780).

Los proyectos de arqueología virtual son ya tan comunes y existen tantas publicaciones que probablemente podría escribirse una tesis a ellos referida. Obviamente, no es cuestión desarrollar en este trabajo dichos proyectos, pero si pueden ser mencionados algunos especialmente relevantes.

En 1984 un programa de la BBC denominado *Waters of bath* fue transmitido en televisión, explicando el trabajo de modelado realizado en Bath, Inglaterra. En el proyecto, el ayuntamiento inició una colaboración entre científicos informáticos de la Universidad de Bath y arqueólogos locales para reconstruir virtualmente esta ciudad romana (Lavender, Wallis, Bowyer & Davenport, 1990, citados en Reilly, 1996, p.94). El complejo de termas de la ciudad romana es uno de los monumentos más visitados de Inglaterra y la creación del modelo virtual buscaba ayudar a los visitantes a comprender lo que estaban observando. Las ruinas conservadas constituyen los restos, bastante incompletos, de lo que un día fue una imponente estructura. El estado que presenta dificulta al público en general, sobre todo aquel poco formado en el ámbito arqueológico, la comprensión y visualización de lo que un día fueron esos baños (Reilly & Rahtz, 2005, p.94). El modelo reconstruido de los baños tenía la intención de ilustrar cómo un ciudadano romano usaba los baños mostrando diferentes habitaciones en su contexto, tal como debieron ser. En el modelo se incluyeron detalles como las piscinas, puertas y ventanas; sin embargo, la carpintería, tuberías y las decoraciones pintadas no fueron recreadas (Lavender et al., 1990, citados en Reilly & Rahtz, 2005, p.94).

También fue reconstruido virtualmente el templo de la ciudad romana, que reveló información solo evidente para aquellas personas que cuentan con amplia experiencia en el ámbito arqueológico (Lavender et al., 1990, citados en De Gross & Lewin, 1996, p.94).

Otro ejemplo fundamental son los modelos y animaciones representando la Catedral Old Minster, de Winchester (Inglaterra). Se trata de un importante ejemplo por ser una de las primeras animaciones realizadas sobre patrimonio histórico perdido, dado que fue realizado entre 1984 y 1986 (Reilly, Todd & Walter, 2016, p.33).

La catedral tiene sus raíces en el s. VII, cuando la monarquía pagana de Inglaterra se convirtió en cristiana y construyó esta pequeña iglesia en forma de cruz, que se conoció como Old Minster. Esta rápidamente se convirtió en una catedral, que destacaba por ser la iglesia real más importante de la Inglaterra anglosajona, por lo que continuó creciendo. En torno al año 1000, Old Minster era un edificio polivalente puesto que no sólo era una poderosa catedral, sino también un próspero convento, un lugar de peregrinación y el lugar de descanso final de los reyes de Sajonia Occidental. Los líderes sajones de Inglaterra fueron derribados por los normandos, por lo que se erigió un nuevo rey que rápidamente se tomó el control de la iglesia y el nuevo obispado comenzó la construcción de una enorme iglesia nueva de estilo románico normando. Tras 450 años, la Catedral Old Minster fue demolida, y sus piedras utilizadas para la nueva catedral. Actualmente, puede ser observada su localización primitiva por el contorno trazado en ladrillo rojo, al norte del nuevo edificio (Winchester Cathedral, s.f.)

Con motivo del mayor gran proyecto constructivo aprobado para el Hotel Wessex, adyacente a los recintos de la Catedral, diferentes excavaciones tuvieron lugar en toda la ciudad de Winchester entre 1961 y 1972, en las que se incluyeron la excavación de la catedral Old Minster (Winchester Excavations Committee, s.f.).

De este modo, tras numerosos estudios, 6 modelos fueron desarrollados en la década de los 80¹² con el sistema Winsom (ver capítulo 2), el cual se basaba en los principios del CSG (Reilly et al., 2016, p.34).

¹² Se emplearon dibujos, planos, secciones y todas las posibles pruebas entonces conocidas, como fotografías de obras semejantes que sobreviven en otras partes de Europa y descripciones históricas.

Hace un par de años los modelos fueron recuperados y en el 2015 fueron restaurados y rediseñados. De este modo, el proyecto original fue reevaluado gracias a las nuevas tecnologías y a mejores prácticas. En este nuevo proyecto, en abril de 2015 se redescubrieron además archivos de modelos que se creían perdidos, lo que conllevó la recuperación de la geometría exacta de los modelos sólidos originales y el modelo virtual ha sido materializado por medio de una impresora 3D. Observando el proyecto con retrospectiva, puede hoy considerarse como el desencadenante de la creatividad en la producción y presentación de interpretaciones hipotéticas y reconstrucciones del patrimonio cultural en formato virtual, lo cual dio lugar a notables menciones en el momento (Reilly et al., 2016, p.33).

Un vídeo que muestra los datos del proyecto, realizado en 1985, puede ser visualizado en la red y resulta realmente interesante, dado que la reconstrucción virtual tiene ya algo más de 20 años. En ella se muestra el aspecto exterior e interior de la catedral, las fases de construcción, datos históricos, etc., por lo que constituye un documento muy similar a los vídeos actuales (Reilly, s.f.).

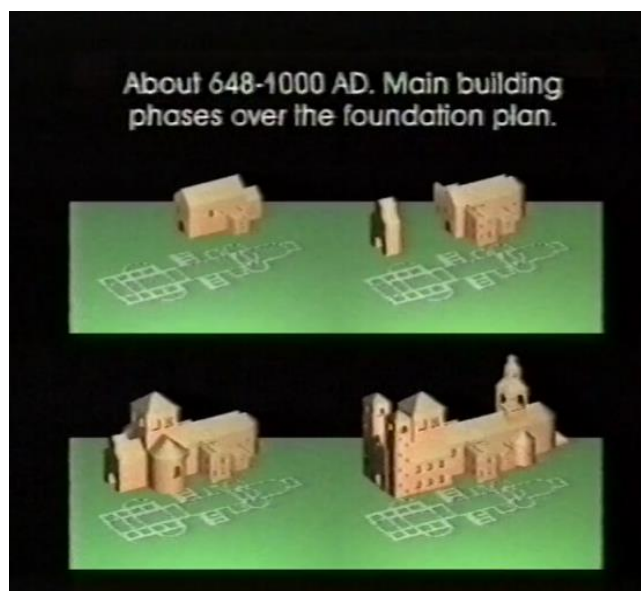


Fig. 275 Imagen del vídeo donde puede verse el templo en 4 fases de construcción diferentes. ©Paul Reilly.

Es tal el avance de la arqueología virtual, que no puede dejar de mencionarse en este apartado cómo Bernard Frischer, editor de la revista en línea *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage (DAACH)* contaba en 2014 que la publicación venía a ser la primera en la que los investigadores podrían difundir modelos digitales 3D de los sitios y monumentos del patrimonio cultural mundial acompañados de artículos científicos asociados. La revista tiene como objetivo preservar los modelos de patrimonio cultural digital y proporcionar a la comunidad académica el acceso a estos para facilitar el debate académico. *DAACH* ofrece a los académicos la oportunidad de publicar sus modelos 3D en línea con una interactividad completa para que los usuarios puedan explorarlos a voluntad.

Estos van unidos a un artículo relacionado que explica la historia y el estado de conservación del monumento modelado, así como una introducción del propio proyecto de modelización. La revista se centra en promover la aplicación de tecnologías 3D a los campos de la arqueología, el arte y la historia arquitectónica, y en hacer una contribución significativa al estudio del patrimonio cultural a través del uso de la tecnología 3D (Frischerde, 2014, p.143).

Los modelos interactivos tridimensionales pueden ser subidos en los formatos .obj, .ply y .u3d. Para los autores de artículos, los modelos 3D pueden favorecer la óptima expresión de los resultados de la investigación, mejorando la comprensión de la misma. Para los lectores, los modelos 3D proporcionan un acceso rápido a la información intuitiva de los datos 3D descritos en el artículo. Se puede navegar por modelos, hacer zoom, girar y desplazar, cambiar la configuración de visualización, ver modelos 3D en el modo estéreo con gafas anaglifo¹³ y descargar archivos. También es posible ver e interactuar con modelos 3D en un modo de pantalla completa. Los modelos 3D que representan los entornos virtuales también se pueden explorar. Para conseguirlo, el visor 3D es compatible con los principales navegadores y dispositivos móviles (Elsevier, s.f.).

7.

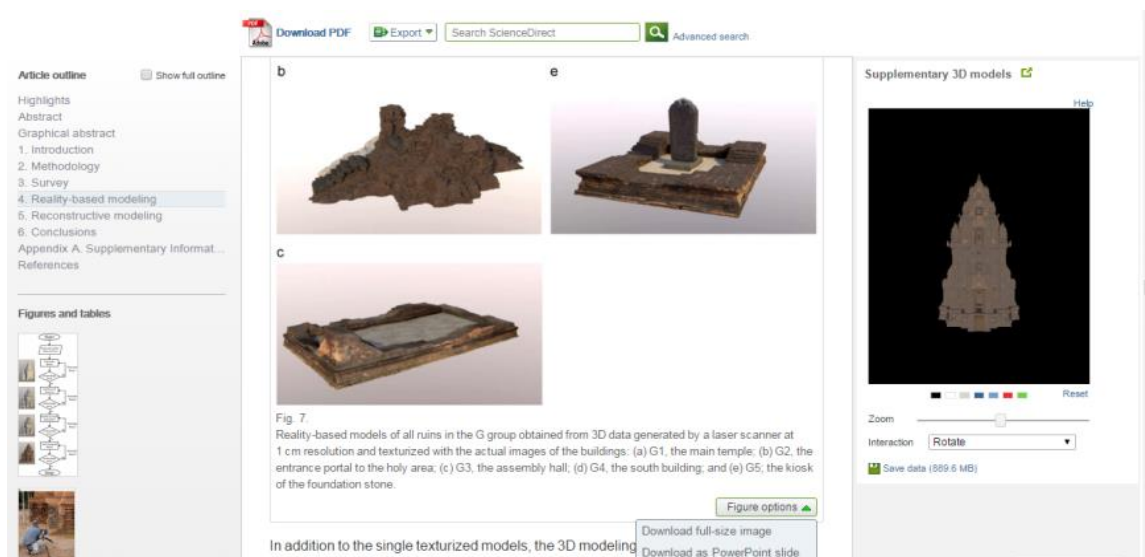


Fig. 276 En este ejemplo aparece el artículo *3D survey and virtual reconstruction of archeological sites* de Gabriele Guidia, Michele Russob y Davide Angeleddua. A lo largo del artículo pueden seleccionarse las figuras para su descarga, y a la derecha, puede verse un modelo 3D complementario que han añadido al artículo. ©Gabriele Guidia, Michele Russob y Davide Angeleddua / Elsevier.

¹³ Estas gafas son aquellas que permiten ver en 3D lo que realmente es en 2D. Un ejemplo constituye las gafas que tienen un ojo azul y otro rojo, muy conocidas por su uso en los cines 3D.

7. 3 Utilización de la tecnología 3D en los museos para fines didácticos y expositivos

En este apartado, primeramente, serán revisados los conceptos de museo, museología y museografía, fundamentales para valorar la información a continuación expuesta.

De este modo, la palabra museo viene del griego *mouseion* (Μουσείον), y significa templo de las musas. En los Estatutos del Consejo Internacional de Museos, ICOM (Desvallées y Mairesse, 2010), el concepto de museo viene así definido:

Institución permanente, sin fines de lucro, al servicio de la sociedad y de su desarrollo, abierta al público que adquiere, conserva, estudia, expone y transmite el patrimonio material e inmaterial de la humanidad y de su medio ambiente con fines de educación y deleite. (p.52)

Derivadas de la palabra museo son: la museología y la museografía. Por un lado, la primera “es una disciplina científica y académica destinada al desarrollo de los museos y de la profesión museal a través de la investigación, el estudio y la difusión de las principales corrientes museológicas” (Desvallées y Mairesse, 2010, p.11); mientras que, por otro lado, la museografía se define en el mismo documento como:

La figura práctica o aplicada de la museología, es decir el conjunto de técnicas desarrolladas para llevar a cabo las funciones museales y particularmente las que conciernen al acondicionamiento del museo, la conservación, la restauración, la seguridad y la exposición. (p.55)

De este modo los cuestionamientos crítico y teórico vinculados al campo museal constituyen la museología, mientras que su aspecto práctico está representado por la museografía (Desvallées y Mairesse, 2010, pp.19 y 20).

Como todo proceso natural, los museos también van evolucionando y cada vez más, se van convirtiendo en lugar de estudio e investigación de las colecciones, a la par que en medio de comunicación de masas. Últimamente surgen nuevas corrientes que centran la labor del museo como servicio público (Hernández Hernández, 1992, p.89).

Desde la perspectiva tradicional, puede decirse que los museos son espacios para la contemplación y la admiración visual de los objetos. Hasta el s. XX constituían grandes almacenes que mostraban bastas acumulaciones de objetos pertenecientes a ciertas culturas o artistas. Actualmente, este concepto ha cambiado mucho y los museos se conciben como lugares de educación, cultura y conocimiento, abriendo sus puertas a todo el público, no sólo a eruditos y estudiosos. Por ello, las experiencias vividas en las instituciones culturales impactan positivamente en la forma de ver el pasado y la cultura, y el aprendizaje experiencial se traduce en mejores resultados en la valoración general de los museos y del patrimonio cultural (Marqués, s.f. b).

Esto es consecuencia de numerosos factores, pero uno de ellos es claramente la implantación de las nuevas tecnologías al servicio de los museos. A continuación, serán revisados algunos de los ejemplos más relevantes sobre cómo estas herramientas han modificado y hecho evolucionar los museos.

José Ramón Alcalá, catedrático de Procedimientos Gráficos y Tecnologías de la Imagen de la Facultad de Bellas Artes de Cuenca y director del MIDE (Museo Internacional de Electrografía) de Cuenca, afirma que un museo constituye un lugar que posee una colección propia y cuyo objetivo es didáctico, a diferencia de las galerías de arte. Esta pretensión de divulgar sus contenidos hace que en los museos se trabaje por conseguir el modo pedagógico más eficaz posible para que dichos contenidos sean comprendidos. También buscan que los accesos a las exposiciones se produzcan en las condiciones sensitivo-perceptivas más ventajosas para el visitante (Alcalá, 2001a, p.45). Tal y como indica Alcalá (2001b):

El papel del museo del siglo XXI debe consistir en la difusión del conocimiento, la creación de las estrategias metodológicas y la construcción de los sistemas expertos capaces de transmitir todo este conocimiento como una experiencia intelectual y sensitiva global.

Desde mediados del s. XX ha habido, por parte de la mayoría de los museos, una gran aceptación de las nuevas tecnologías. Estas han sido implementadas como servicio para la sociedad y como recurso para mejorar sus funciones como instituciones transmisoras de cultura e identidad (Zapatero, 2007, p.14). A su vez, la tecnología web presenta múltiples ventajas que pueden ser aprovechadas por los espacios de presentación del patrimonio para conseguir un mejor desarrollo de su labor, destacando entre todas ellas la trasgresión de las barreras del tiempo y del espacio. En el siguiente apartado puede verse como, gracias a la aparición de internet, los usuarios pueden visitar los espacios web de los museos desde cualquier lugar en cualquier momento, suponiendo la posibilidad de un acceso continuo, así como una distribución masiva de la información.

Tal y como puede observarse, la tecnología constituye un papel fundamental en la puesta en valor del patrimonio y, sobre todo, para promover su aplicación para el aprendizaje. Tan destacable es su papel que, partiendo de esta premisa, surgió el proyecto *Lazos de Luz Azul*, Proyecto del Plan Nacional de D+I+i gestionado por el Ministerio de Educación y Ciencia. Este tuvo como objetivo general estudiar las prácticas del uso de las tecnologías en los programas y acciones educativas de museos y patrimonio¹⁴ (Proyecto *Lazos de Luz Azul*, 2009). Tras años de investigación, las conclusiones alcanzadas fueron que las tecnologías no constituían un objetivo en sí mismas, dado que era necesario aplicarlas con un espíritu reflexivo y valorativo, de manera que se apreciaran las ventajas e inconvenientes de su empleo. Si esto se consiguiese, la eficacia de las inversiones quedaría garantizada (Asensio y Asenjo, s.f., p.97).

El proyecto fue publicado en 2011 y posteriormente los autores han continuado desarrollando y publicando sobre tecnología, realidad virtual y “mobile learning” (Asensio, M., comunicación personal vía e-mail, 17 de noviembre de 2016).

Las nuevas tecnologías de la información y de la comunicación dejan ver que, a mayor coherencia en la aplicación de los contenidos con el medio tecnológico utilizado, mejores

¹⁴ Otros objetivos concretos eran: estudiar los efectos perversos de las tecnologías tales como los problemas asociados a los diseños de los formatos, los relativos a los usos de los programas, y los derivados de los efectos de la manipulación de los procesos de aprendizaje, evaluar la adecuación de los programas y acciones de tecnologías para el aprendizaje en museos y patrimonio a los niveles de pericia de los usuarios y revisar las reflexiones y los modelos sobre las tecnologías para el aprendizaje en museos y patrimonio, realizar estudios de caso como ejemplos prototípicos que puedan utilizarse analógicamente para ilustrar las características, las condiciones de aplicación, las ventajas y los inconvenientes de los programas que se aplican en dichos centros y analizar las expectativas y las demandas de los diferentes tipos de públicos objetivo.

resultados y mayor eficacia divulgativa se obtiene. Así, es probable que la posibilidad de convertir en tecnológica toda la información, recursos y sistemas didácticos de los museos, provea de las condiciones necesarias que consigan una mayor inmersión del museo en las aulas, e incluso en los laboratorios de investigación (Alcalá, 2001a:46).

Por todo ello, los museos, que son reflejo de la sociedad, han acogido todas estas innovaciones hasta incorporarlas como un recurso más en sus exposiciones permanentes y temporales (Rodríguez Bernis, 2013).

7. 3. 1 Museos virtuales

Tal y como ha sido comentado anteriormente, el lenguaje VRML permite ofrecer en Internet versiones virtuales de cualquier tipo de museo o galería de arte del mundo. Así, prácticamente cualquier persona puede acceder, no sólo a la imagen digitalizada de una obra, a explicaciones textuales, sonoras o audiovisuales sobre esta misma, sino que también puede visitar las instalaciones del museo y recorrerlas virtualmente (Hilera et al., 1999).

De este modo, el término museo virtual se ha ido empleando cada vez más en los últimos 10 años; sin embargo, se ha de indicar también que ha sido adoptado de formas muy diferentes, refiriéndose a museos online, reconstrucciones 3D, aplicaciones interactivas, etc. (Pescarin, 2014, p.130), museo hipermedia o multimedia, cibermuseo, museo digital y museo virtual. Para Asenjo (2014) el museo virtual es:

Una colección digital de objetos relacionados de forma lógica que incluye una variedad de medios de comunicación, los cuales promueven una capacidad de conexión y varios puntos de acceso, lo que permite trascender los métodos tradicionales de comunicación e interacción con los visitantes, siendo flexible hacia sus necesidades e intereses. (p.118)

Por otro lado, la *Encyclopædia Britannica* (s.f.) se refiere a un museo virtual como:

Colección de imágenes grabadas digitalmente, archivos de sonido, documentos de texto y otros datos de interés histórico, científico o cultural a los que se accede a través de medios electrónicos. Un museo virtual no alberga objetos reales y por lo tanto carece de la permanencia y cualidades únicas de un museo en la definición institucional del término. De hecho, la mayoría de los museos virtuales son patrocinados por museos institucionales y son directamente dependientes de sus colecciones existentes.

Por su parte F. Antinucci (2007), del Istituto di Scienze e Tecnologie della Cognizione de Roma, definiendo lo que "no es" un museo virtual propone que "no es el verdadero museo trasladado a la web ni a ninguna forma electrónica", ni "un archivo de base de datos o complemento electrónico del museo real", ni "lo que falta en el museo real" (citado en Pescarin, 2014, p.130).

Contrariamente a lo que ocurre actualmente, las primeras experiencias en exposiciones virtuales, realizadas en el Instituto Franklin de Filadelfia, demostraron que la visita virtual disminuía el flujo de visitantes al museo físico. Esto ocurría porque los visitantes daban por vistas las obras, lo que hizo disminuir las visitas físicas a los museos (Pastor, 2004, citado en Asenjo, 2014, p.117). Este hecho se dio especialmente en museos de arte con colecciones poco emblemáticas y hoy se cree que estos resultados se debieron a que en estos primeros casos no se estaba añadiendo ningún valor a la mera visualización de las obras, ni en el caso del museo físico, ni en el de las visitas virtuales. Tras las primeras experiencias, numerosos museos eliminaron las visitas virtuales de sus páginas web.

A raíz de estos acontecimientos, surge la necesidad de diferenciar los objetivos de la visita virtual de los de la visita física, diversificando la oferta en uno y otro caso. Contrariamente a lo ocurrido con los primeros museos virtuales, hoy en día las visitas virtuales tienen un gran potencial para atraer nuevos visitantes al museo físico, por lo que los museos más aventajados comenzaron a demandarlas como estrategia de captación (Asenjo, 2014, p.118).

Volviendo a las definiciones del ICOM, los museos y los museos virtuales comparten 5 características comunes: 1) existe a menudo una institución detrás del museo; 2) el patrimonio tanto tangible como el intangible forma las colecciones; 3) cuenta siempre con un sistema de comunicación; 4) se crea con el fin de ser accesible por un público; 5) se construye siguiendo uno o más ámbitos, tales como la educación, el estudio y el disfrute (Pescarin, 2014, p.130).

Actualmente, la mayoría de los museos cuentan con la posibilidad de acceder a su colección desde cualquier parte del mundo, siendo únicamente necesarios una conexión a internet y un dispositivo que permita visualizar los datos.

En los últimos años, estos museos han proliferado notablemente. Dado que la comunicación visual ejerce una gran capacidad de seducción al simplificar y hacer más atractiva la visita, la oportunidad de interactuar con contenido multimedia ha dado lugar a una enorme proliferación de museos virtuales en la web (Stanco & Tanasi, 2011, p.3).

Existen varios tipos de museos virtuales que pueden definirse en función de los siguientes factores (Pescarin, 2014, p.131):

- 1) El contenido: arqueología, historia, arte, etnografía, historia natural, tecnología, diseño...
- 2) La tecnología de la interacción: considerando la tecnología de interacción, existen dos tipos principales: por un lado, los museos virtuales interactivos, que emplean la interacción basada en dispositivos como el ratón, el joystick, el habla o la interacción basada en el gesto y por el otro, los museos virtuales no interactivos, que proporcionan al usuario un servicio de participación pasiva.
- 3) Duración: se puede instalar un museo virtual permanente o temporal.
- 4) Comunicación: a pesar de que existen varios tipos de narrativas, una distinción básica puede hacerse entre exposición, descripción y narración. Una narración implica una secuencia de acontecimientos que son informados a un "receptor" de una manera subjetiva. En la exposición o descripción el concepto se define e interpreta para informar.
- 5) Nivel de inmersión: puede ofrecerse una inmersión alta, baja o la no-inmersión.

- 6) Distribución: existe una categoría adicional que considera la distribución del museo virtual.
- 7) Ámbito: se distinguen seis posibles ámbitos: educación, entretenimiento lúdico, entretenimiento, investigación, mejora de la experiencia del visitante y promoción.
- 8) Nivel de sostenibilidad: la capacidad de ser persistente y duradero en el futuro.

Por su parte, Núria Serrat Antolí, profesora, investigadora y doctora en Pedagogía por la Universidad de Barcelona (Universitat de Barcelona, 2011), explica que un museo virtual constituye un entorno en el que se presenta un conjunto de información (tales como texto, gráficos, imágenes, vídeo) sobre una colección de piezas o bien un conjunto patrimonial. Estos pueden existir físicamente o no, puesto que pueden haber desaparecido por problemas de conservación, pérdidas, robos, etc., y poseen unas características de interactividad que permiten una gran participación por parte del usuario. Para ella, el museo virtual presenta dos claras ventajas de carácter muy práctico: 1. Permite ser visitado sin necesidad de desplazarse, opción especialmente idónea en casos en que el lugar que se desea visitar se encuentra lejos. 2. Posibilidad de planificar una posible visita real. A su vez, declara que se facilita el acceso directo a la información, al intercambio de ideas y experiencias entre y con los profesionales del museo, muestra de una manera interactiva las colecciones de un museo o las potencialidades de un conjunto patrimonial y ofrece actividades alternativas a las existentes en un museo, tales como el chat, la creación de fórum, la propia visita virtual.

En su blog referente a los Museos virtuales, Nuria Serrat afirma que el museo físico y su recreación o visualización virtual no deben equipararse. Lógicamente, la experiencia que supone el contacto directo con las obras y colecciones de un museo es una vivencia insustituible (su entorno envuelve al visitante). Sin embargo, numerosos museos virtuales buscan que sus visitantes virtuales tengan una experiencia memorable e irrepetible gracias a la interactividad, implicación y participación. La interactividad ha de ser una condición que mantenga al visitante dispuesto a pasar horas navegando y descubriendo el museo, por lo que el museo virtual debe ofertar todas las posibilidades que internet posee y plantearlas de un modo práctico, intuitivo y ameno (Serrat, s.f.).

Además, existen ya disciplinas técnicas que presentan estas acciones como solución a los problemas presentes en instituciones físicas derivados de espacios limitados, así como el considerable ahorro de dinero si se compara con el coste que supone el montaje de una exposición *in situ*. También los conservadores y comisarios de exposiciones experimentan cierto alivio ante su preocupación en el traslado de obras especialmente frágiles de las colecciones (Styliani, Liarokapis, Kotsakis & Patias, 2009, citados en Asenjo, 2014, p.117).

Es muy común que los usuarios de estos museos se interesen por contenidos que, de no ser por lo museos virtuales, no habrían conocido. Además, puede hacerse uso de esta información en cualquier lugar a cualquier hora, siempre que exista una conexión a internet. Del mismo modo, museos que por reformas u otro tipo de contingencias se encuentren cerrados al público, pueden seguir con sus labores de difusión sin que el contacto de los usuarios con el museo se vea privado. Con la red, los museos tradicionales rompen los límites físicos y temporales y la capacidad de actualización continua es constante, lo que sin red resultaría imposible debido al tremendo coste que supondría la continua actualización en papel de todos aquellos cambios o modificaciones que el museo quisiera notificar. No hay que olvidar que internet permite también la conexión de museos entre sí facilitando la búsqueda y el acceso a la información que puede así ser compartida (Zapatero, 2007, p.85). Los museos virtuales buscan de este modo generar una conexión entre los restos del pasado y sus conocimientos, así como conseguir que los usuarios experimenten el futuro de su pasado (Pescarin, 2014, pp.130 y 131).

En España, cada vez es más común que los museos cuenten con visitas y recorridos virtuales. La visita virtual es manejada por el visitante, como se ha explicado, se interactúa y escoge tanto el recorrido como los detalles que desean ser ampliados, las cartelas que quieren leerse, etc.

Los recorridos virtuales, por su parte, suelen ser vídeos ya grabados en los que no se permite interactuar, y simplemente es posible su reproducción, pero con ellos se crea en el espectador una imagen e idea precisa de lo que el museo expone. Los recorridos pueden ser en 3D, aunque generalmente si la información puede ser simplemente documentada de manera tradicional, es decir con una grabación común, esta suele ser la opción más habitual. Estos recorridos no suelen ser muy largos, aunque dependen de las características

del museo y muestran el recorrido de una exposición en concreto o las salas más importantes de una colección permanente. En ocasiones incluyen planos ajenos a las salas de exposiciones, tales como los alrededores del museo, su entrada, las taquillas, etc. Todo ello permite ampliar la información y las referencias visuales del museo, puesto que puede ocurrir que en los vídeos solo sean visitadas las salas, dejando sin contextualizar el edificio, lo que, como bien es sabido, también es fundamental. Sin embargo, todo esto dependerá, una vez más, del fin con el que el vídeo ha sido grabado. Cuando se trata de una exposición temporal en concreto, no tiene por qué presentarse relevante la grabación del edificio, mientras que, si el video quiere invitar a un público en particular a acudir a sus exposiciones, será conveniente que determinados planos e imágenes del edificio sus inmediaciones sean incluidos.

Este recurso, además de tener un carácter muy didáctico, constituye un importante avance para aulas o cursos. En caso de niños o bien de público adulto que no maneja los controles del ordenador, se presenta como una opción muy recomendable, puesto que se consigue una idea general del museo.

El museo virtual puede perfectamente actuar como recurso didáctico dentro del aula. El docente debe valorar el empleo de entornos virtuales que articulen sus propuestas. Lógicamente, existen muchos museos virtuales que ya contemplan esta posibilidad y poseen espacios específicos para los docentes, ofreciendo materiales didácticos para preparar el trabajo en el mismo museo virtual o como material de soporte para el aula. Algunos museos se configuran como verdaderos recursos educativos, por lo que proponen actividades didácticas on-line e incluyen y ponen al alcance del docente fichas didácticas sobre los contenidos del museo u otros, potenciando debates virtuales sobre temas de actualidad y ofreciendo bases de datos temáticos sobre las colecciones del museo, etc.

Los museos virtuales se presentan también como espacios idóneos para el trabajo cooperativo entre escuelas y profesionales, ya que muchos de ellos estimulan el intercambio de experiencias e ideas a partir de foros y chats (Serrat, s.f.).

Además de las propias webs de los museos, existen numerosas páginas donde pueden encontrarse los enlaces que muestran recorridos y visitas virtuales. En la página del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte de España, existe la posibilidad de enlazar con nuevos recursos virtuales de los museos de la Subdirección General de Museos Estatales, dando lugar a las visitas virtuales y vídeos con recorridos por sus diferentes espacios. En

este caso, la página enlaza con las visitas virtuales del Museo del Traje, del Museo Nacional de Antropología, de la Cocina Valenciana del Museo Nacional de Artes Decorativas, del Museo Sorolla, del Museo Cerralbo, con el Museo Arqueológico Nacional y el Museo de América de Madrid, todos ellos de Madrid. Otras visitas corresponden al Museo Sefardí de Toledo, el Museo Casa de Cervantes de Valladolid, el del Greco de Toledo, el Museo Nacional de Cerámica y Artes Suntuarias “González Martí” de Valencia, el Museo Nacional de Escultura de Valladolid y también por el Museo Nacional del Romanticismo (Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, s.f. b).

También Google colabora con la difusión del patrimonio puesto que actualmente cuenta con una sección llamada Google Arts & Culture. Esta sección posibilita la exploración de historias y colecciones de todo el mundo e incluye contenido de más de 1200 museos, así como archivos destacados que han colaborado con Google Cultural Institute para conseguir que los tesoros del mundo estén disponibles online.

La cantidad de información que recoge es realmente sorprendente; entre otros, destacan digitalizaciones 3D, anécdotas sobre obras en concreto, proyectos destacados y exploradores de museos (Google Arts & Culture, s.f. a). Por ejemplo, el Musée d’Orsay puede ser explorado desde casa para apreciar la belleza de sus obras (Google Arts & Culture, s.f. b).

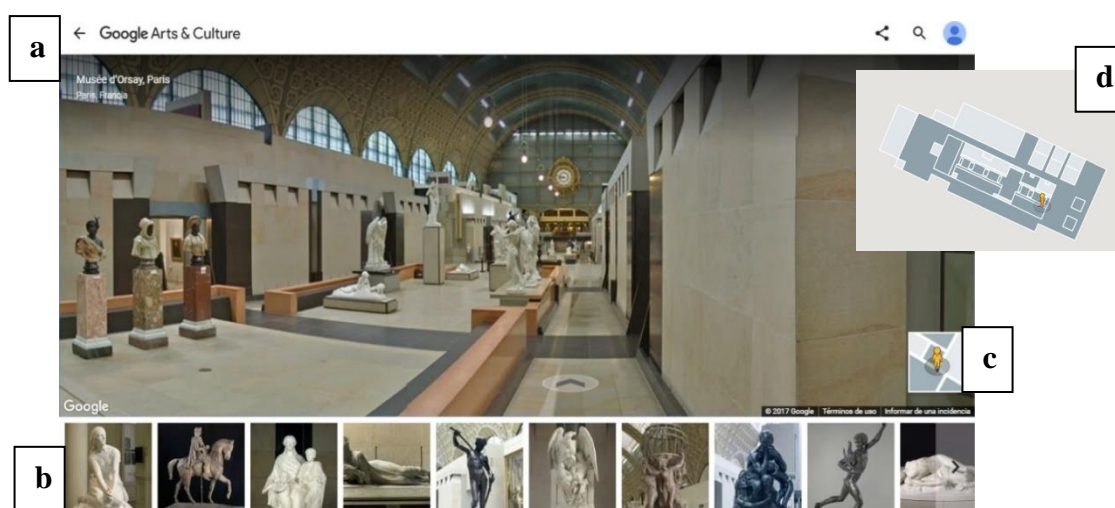


Fig. 277 Musée d’Orsay explorado desde Google Arts & Culture: en la imagen puede verse el explorador de Google del Musée d’Orsay (a), en el cual se puede ir avanzado y navegar visitando el museo virtualmente. En la parte inferior de la interfaz (b) aparecen fotografías de diferentes obras que pueden seleccionarse directamente, y el explorador lleva al usuario a la sala y punto exacto donde se encuentra. También puede verse un pequeño cuadrado donde aparece un individuo sobre un mapa (c) y pulsado sobre ese icono, aparece el mapa del museo (d), en el cual se puede escoger donde ir directamente sin pasar por el resto de salas. ©Google Arts & Culture / Musée d’Orsay.

También se puede navegar por otros museos desde Google See Inside, de Street View. Buen ejemplo constituye el British Museum, que puede verse y se puede pasear por él virtualmente gracias a Google (Google, s.f.).

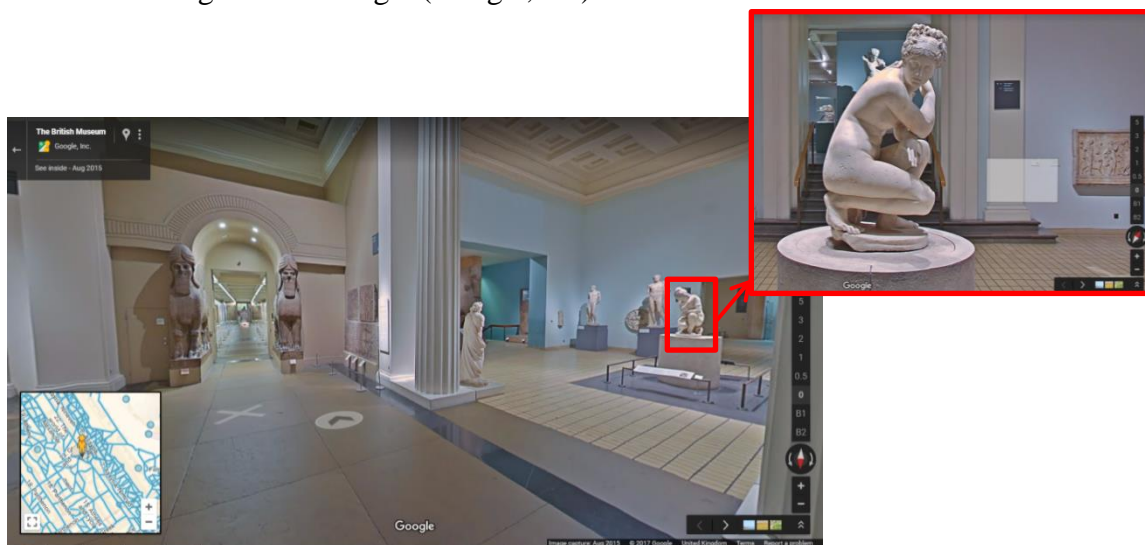


Fig. 278 Imagen que muestra el interior del British Museum por el cual puede pasearse virtualmente. Tal y como puede verse en la imagen superior a la derecha, existe la posibilidad de acercarse a las piezas que más interesen al usuario/a y verlas desde el ángulo deseado. ©Google / British Museum.

En España, debe citarse el Museo Sefardí de Toledo. Este se creó en 1964 en el edificio hispanojudío más importante de España: la Sinagoga de Samuel ha-Leví, conocida como la Sinagoga del Tránsito, situada en plena judería de Toledo. Las salas del museo ocupan los espacios del antiguo archivo de las órdenes militares de Calatrava y de Alcántara y consta de varias salas, dos patios y la tienda del museo (Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, s.f. a).

La siguiente figura muestra la visita virtual del museo, en la que puede verse la primera planta, correspondiente a la sala de oración. Desde esta, haciendo uso del ratón, se puede acceder al resto del museo, ya sea escogiendo directamente otra planta o bien realizando el recorrido como si se estuviese físicamente allí, es decir, caminando a lo largo de todo el museo. Una vez se escoge una vitrina, el visitante puede acercarse considerablemente sin perder calidad de la imagen. Además, puede escogerse información sobre los objetos patrimoniales, simplemente seleccionando el deseado, de modo que un panel se abre y aporta relevante información, apareciendo a su vez el número de vitrina y el del fondo museístico correspondiente. En algunos objetos, el panel permite acceder a otros enlaces para ampliar la información referente al objeto, tales como otras páginas webs o vídeos.

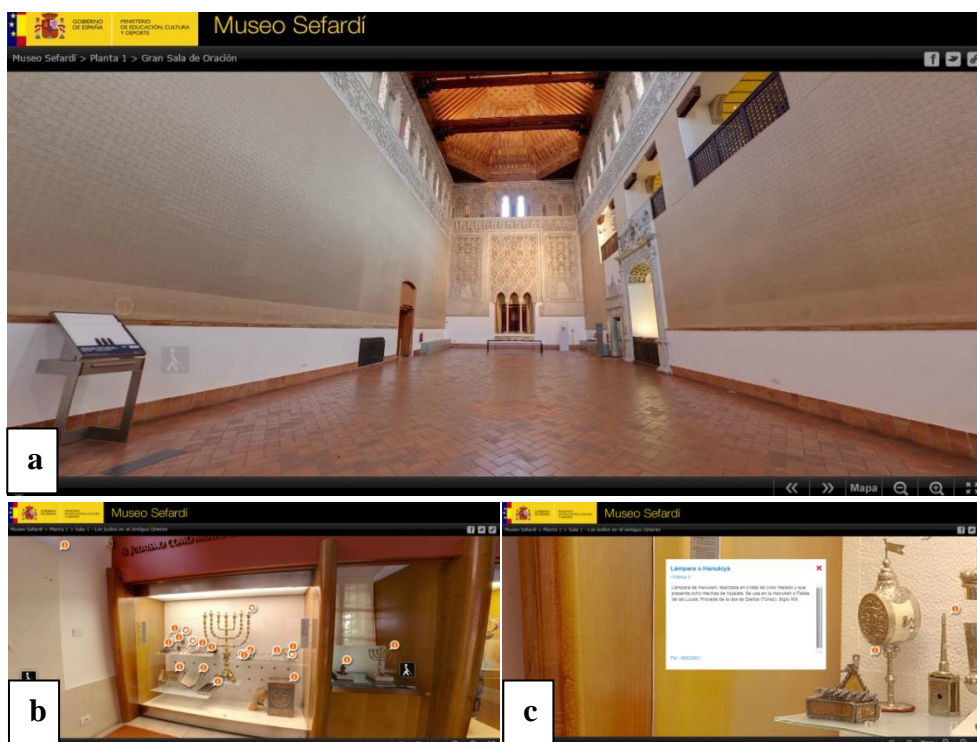


Fig. 279 Museo Sefardi de Toledo: a) sala de oración; b) sala 1 denominada *Los judíos en el antiguo Oriente*. En ella aparece una vitrina donde puede leerse el rótulo *El judaísmo como modo de vida* y muestra diferentes objetos con numerosos números; c) imagen de la vitrina ampliada casi al máximo posible permitido por la visita visual. Se ha seleccionado un objeto y la información referente a este se desglosa. ©Ministerio de Educación, Cultura y Deporte / Museo Sefardi.

La mayoría de museos virtuales existentes en la red cuentan con un museo real, aunque existen algunos museos virtuales que no tienen un museo real que lo sustente. Como ejemplo de estos últimos casos puede citarse el proyecto denominado *Museum of Pure Form*¹⁵. El proyecto nace en septiembre del 2001. Su objetivo principal fue crear un sistema de entornos virtuales a través del cual el visitante pudiera interactuar físicamente, de un modo táctil y visual, con modelos 3D de esculturas y objetos patrimoniales. La novedad radicaba en la posibilidad de tocar las esculturas que ante el visitante se mostrasen virtualmente empleando para ello una especie de exoesqueleto y unos guantes (Turismo in Toscana, s.f.).

¹⁵ Proyecto dirigido por la Scuola Superiore Sant'Anna, de Pisa, en Italia, y en él colaboró el Museo dell'Opera del Duomo, de Pisa, el Centro Gallego de Arte Contemporáneo, Santiago de Compostela, en España, CGA, El Museo Nacional de Estocolmo, en Suecia y El Museo Petrie de Londres en el Reino Unido. El University College de Londres, la Universidad de Uppsala en Suecia, la Sociedad Pont-Tech y 3D Scanners fueron los socios tecnológicos. A su vez, forma parte del programa de Information Society Technologies, IST, de la Unión Europea junto con el Laboratorio PERCRO, Perceptual Robotics (Cnr Pisa, 2011).

El proyecto fue orientado hacia la realización de copias virtuales de conocidas esculturas para que convivieran en armonía con otras obras de otros museos. Para ello se digitalizaron, milímetro a milímetro, diversas esculturas a fin de crear clónicos modelos tridimensionales (Loscos et al., 2004).

Las obras de la colección incluían esculturas digitalizadas de museos internacionales y europeos, además de obras de artistas contemporáneos encargadas por el Museo¹⁶. El museo buscaba ofrecer nuevas posibilidades para la interacción con los modelos 3D de objetos del patrimonio cultural a través del sentido del tacto y de la vista. El objetivo del proyecto era permitir la apreciación de las obras, no solo a los visitantes habituales y mayoritarios de museos tales como público en general, estudiantes e investigadores, sino también a usuarios ciegos o con deficiencias visuales, que podrían interactuar con los modelos. Para ello, el museo empleó un innovador concepto de la percepción háptica¹⁷, superando así el tradicional límite del disfrute del arte basado en la mera observación visual. Los dispositivos hápticos constituyen sistemas ideados para ejercer una determinada fuerza controlada por la superficie de un objeto virtual en la mano del usuario, provocándole a este la sensación de tocar dicho objeto virtual. Estos dispositivos son capaces de ejercer fuerzas en las yemas de los dedos índice y pulgar del usuario. Estos dispositivos están montados en un antropomorfo, que puede ponerse en el brazo del usuario (Loscos et al., 2004).

Así, el visitante podía iniciar la exploración de la superficie de la obra con el dispositivo, que está constituido por dos nódulos computacionales capaces de valorar la potencia y la distancia del toque, permitiendo que el usuario intuya la forma y la textura de la infografía virtual (Bellido, 2013, p.216)

Al emplear modelos 3D, el museo no estaba instalado en un sitio físico en concreto, sino que contaba con un entorno virtual multiusuario e inmersivo, donde se muestran las representaciones digitales. Los modelos digitales hápticos son escalables, pueden ampliarse y reducir a gusto del visitante, y constituyen perfectas representaciones de las

¹⁶ Entre otras, se digitalizaron del Centro Gallego de Arte Contemporáneo dos esculturas de Stephan Balkenhol y Xavier Toubes; del Duomo de Pisa, Salomé, de Giovanni Pisano, Madonna, de Nicola Pisano, San Juan Bautista, de Nicola y Giovanni Pisano; y del Liverpool Museum, National Museums and Galleries on Meyerside, las piezas clásicas Artemis y Retrato de un Joven.

¹⁷ Del griego "*haptesthai*" que significa "tocar". La percepción háptica es el sistema de percepción, integración y asimilación de sensaciones, a través del tacto activo. Constituye la base del desarrollo y aprendizaje de los alumnos con discapacidad visual, especialmente de los que presentan ceguera total (Ministerio de Educación, s.f., p.8).

obras originales, por lo que pueden ser empleados en investigaciones y estudios, muy especialmente cuando las obras reales presentan problemas de conservación o son de difícil acceso (Virtual Museum Transnational Network, 2011).

Se realizaron dos tipos de instalaciones con similares capacidades, pero diferentes funcionalidades. La primera de ellas se ubicó en un museo real, con esculturas que los visitantes podían visitar y además se les brindaba la posibilidad de acceder a la galería virtual. La primera realización del Museo fue presentada en septiembre de 2003 en el Museo de la Ópera, OPAE (Feijóo J., comunicación persona vía e-mail, 17 de noviembre de 2016).

La otra instalación no contaba con museo; en ella, el público podía acceder a una habitación multimedia en la que se hospedaba el sistema de *Pure Form*, donde los visitantes se veían inmersos en una tranquila atmósfera. En uno de los muros de la habitación, una proyección 3D estereoscópica de un ambiente virtual era presentada al usuario, que podía interactuar con la interfaz háptica sentándose enfrente del muro. Un audio explicaba los orígenes y detalles referentes a los trabajos. La galería virtual era así recreada en un entorno de realidad virtual inmersiva, CAVE¹⁸. El realismo de las simulaciones virtuales fue tan alto que los visitantes aseguraron que sentían con sus manos el tacto real de las superficies de las visualizaciones. Su primera instalación fue en noviembre de 2003 en el Departamento de Ciencias Informáticas de la Universidad de Londres (Feijóo J., comunicación persona vía e-mail, 17 de noviembre de 2016).



Fig. 280 La imagen de la izquierda muestra el museo de la Pure Form y a la derecha puede verse un ejemplo de una de las obras. ©C. Loscos, F. Tecchia, A. Frisoli. M. Carrozzino, H. Ritter Widenfeld, D. Swapp & M. Bergamasco.

¹⁸ CAVE constituye una proyección que se basa en la realidad virtual. Esta es instalada en una sala en forma de cubo en la que hay proyectores orientados hacia las diferentes paredes, suelo y techo. Dependiendo del resultado que se quiera obtener, se proyectará la imagen a todas o sólo alguna de las paredes de la sala.

Para llevar a cabo ambas instalaciones, se emplearon escáneres 3D con el fin de obtener las digitalizaciones de las obras. El primer paso fue decidir qué esculturas iban a digitalizarse, por lo que fueron consultados los museos participantes y, para la selección se tuvo en cuenta: el interés que para los museos presentaba la obra, así como para los visitantes, la disponibilidad de la misma y la

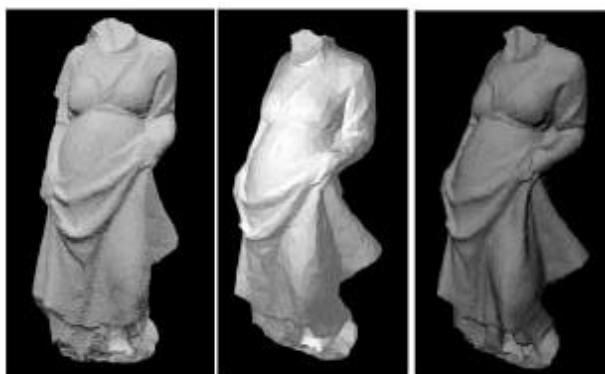


Fig. 281 La imagen de la izquierda muestra la malla escaneada; la del medio aparece simplificada (con los polígonos reducidos) y la de la derecha renderizada. ©C. Loscos, F. Tecchia, A. Frisoli. M. Carrozzino, H. Ritter Widenfeld, D. Swapp & M. Bergamasco.

idoneidad de su exploración. Este último factor venía determinado por el espacio que rodea la pieza, dado que los equipos de escaneado debían adaptarse a la situación de las mismas; en caso de no ser suficiente, las posibilidades de desplazar la obra para el escaneado debían ser óptimas y no implicar daños sobre la integridad física de las mismas. El material constitutivo de la obra y su superficie también debía ser tenidos en cuenta puesto que, como ya se ha indicado, en esos momentos la tecnología no permitía el registro de superficies brillantes o con excesivas texturas. A pesar de estos inconvenientes, el proyecto consiguió digitalizar una taza en cobre y una estatua en alabastro. El proceso de escaneado fue llevado a cabo por la compañía de escáneres 3D S.A., los datos obtenidos fueron procesados para reducir el número de polígonos y después se incluyeron en el museo virtual (Loscos et al., 2004).

Con el fin de presentar los modelos escaneados a los visitantes, crearon el museo virtual con 3DsMax. El museo fue diseñado teniendo en cuenta, entre otras reglas, que debía contar con carteles que ilustrasen el origen y contexto histórico y cultural de la obra en cuestión, así como carteles del museo en cada una de las habitaciones, con el fin de mantener la identidad del mismo (Loscos et al., 2004).



Fig. 282 En la imagen puede verse a un usuario tocando la escultura con el exoesqueleto. ©C. Loscos, F. Tecchia, A. Frisoli. M. Carrozzino, H. Ritter Widenfeld, D. Swapp & M. Bergamasco.

Por otra parte, la creación de galerías y laboratorios electrónicos para el arte virtual refleja la necesidad del artista digital para presentar sus obras y la exigencia del campo museístico actual por utilizar el sistema on-line como plataforma de divulgación y distribución de las obras de arte (Alcalá, 2003, p.61).

De este modo nuevas plataformas surgen y buscan tener una experiencia expositiva diferente a los formatos web convencionales, integrando las obras dentro de una arquitectura virtual de la galería, donde se reproducen las paredes en perspectiva y es posible interactuar con el espacio (Subirats, s.f.).

Un ejemplo interesante es Virtual Gallery, que desde 2011 ofrece a los artistas que se hayan registrado en su web un área expositiva que se presenta como un espacio tridimensional parecido a una sala de exposiciones con pentágonos en el suelo, los cuales permiten al usuario navegar por la sala. Al seleccionar una obra con el cursor, se despliega la información del cuadro y la posibilidad de verlo si se está registrado (Subirats, s.f.).

Por otra parte, una de las iniciativas más importantes para diseñar y difundir exposiciones de arte en entornos digitales de galería virtual es People Art Factory. La plataforma ha sido creada por Raúl Ballester y Pedro Cárceles desde Murcia para que un artista o un comisario pueda desarrollar el discurso deseado, dado que permite crear un recorrido de visualización de las obras por una sala de exposiciones totalmente personalizada. Generalmente, los espacios expositivos virtuales ya vienen pre-configurados (Subirats, s.f.), es decir, la disposición de las salas tiene una configuración establecida por el servidor. Sin embargo, en esta plataforma puede realizarse el diseño al completo de la exposición: permite incluir el título y las características de la obra en una cartela, indicando las dimensiones reales de la obra; también puede accederse a un histórico de obras que ya hayan sido cargadas anteriormente para agilizar el proceso; se pueden definir las dimensiones y el plano esquemático de la sala, definir la altura de éstas y la entrada y recorrido de la exposición. Una vez se tienen estos datos, pueden escogerse las ubicaciones de las obras y los marcos que se le quieran añadir, entre otras acciones (People Art Factory, 2014).

Por tanto, la constitución de estos “lugares virtuales para la representación” ya no requiere necesariamente espacios representativos tales como habitaciones con paredes. De hecho, los nuevos espacios que, por ejemplo, fueron diseñados para la galería virtual del

proyecto *eGALAB*, conformaban los espacios a partir de la información misma, constituyendo todo un desafío técnico y conceptual (Alcalá, 2003, pp.61 y 62). *eGALAB*, *Virtual galleries & Laboratories for electronic art* es un proyecto desarrollado entre 2002 y 2003 por CIANT (Internacional Centre for Art and New Technologies, de Praga), CYPRES (Centre Interculturel de Practiques, Recherches et Echanges Transdisciplinaires, de Marsella) y por el MIDE (Museo Internacional de Electrografía, de Cuenca). El proyecto fue desarrollado a partir del programa Culture 2000 de la Unión Europea y tenía como objetivos preferentes: establecer una nueva plataforma para la creación artística, la experimentación y la exhibición en la red internet, basada en el uso de nuevas tecnologías dentro del campo cultural, construir una sistema técnico en VRML que permitiera a grupos de artistas visuales trabajar juntos en proyectos dentro de espacios virtuales en 3D y de manera on-line, llevar a cabo una serie de talleres basados en las presentaciones y creaciones artísticas dentro de espacios virtuales y promover la divulgación y la educación en el área de galerías y talleres electrónicos, facilitando al público en general el acceso a la red internet y a creaciones artísticas virtuales de una manera nueva e intuitiva. Las performances de presentación del proyecto y de sus prototipos, LAB y Galería Virtual, fueron realizadas en el teatro Akrópolis de Praga durante los días 28, 29 y 30 de marzo de 2003 (Alcalá, 2003).

Actualmente, el proyecto se ha cerrado al terminarse su período de financiación por parte de la Unión europea. Sin embargo, tanto el grupo y el centro de Praga, dirigido por Pavel Smetana, como el MIDECIANT, de la UCLM, en Cuenca, continúan desarrollando estas interesantes ideas y trabajando en la línea de investigación a través de otros proyectos (Alcalá, J. R., comunicación personal vía e-mail, 22 de noviembre de 2016.)

No obstante, es fundamental destacar que a pesar de las ventajas y nuevas experiencias que estas galerías y museos virtuales proponen, no se debe restar valor a la experiencia vivida en el encuentro físico e inmediato con una obra (Lebrero, 2003, p.65). Estas galerías y museos no sustituyen a los originales, cuando estos existen, si no que los complementan y son una herramienta más que, como se ha desglosado en líneas anteriores, tiene numerosas aplicaciones positivas (en el ámbito de la difusión de las obras y desde el punto didáctico y también para los artistas).

7. 3. 2 Museos, exposiciones y otros recursos para invidentes

En los años 70 del s. XIX, se inicia por parte del Colegio Nacional de Sordomudos y Ciegos de Madrid una serie de colecciones didácticas. Esta acabaría convirtiéndose en una opción de educación permanente auspiciada desde las asociaciones de trabajadores ciegos y dirigida al público adulto (Museo Tiflológico, s.f.).

Como continuación de este proyecto surge el Museo Tiflológico, inaugurado el 14 de diciembre de 1992 por la Organización Nacional de Ciegos Españoles, ONCE. El museo buscaba permitir el normal acceso a un museo por parte de personas ciegas, sin que la deficiencia visual impidiese estudiar o disfrutar de las piezas. Actualmente, el museo es un espacio concebido para que sus visitantes puedan ver y tocar las piezas expuestas. En él participan las salas dedicadas a la exposición de las obras plásticas de los artistas ciegos y con discapacidad visual grave, las dedicadas a la exposición de material tiflológico y las correspondientes a las maquetas de monumentos arquitectónicos (Museo Tiflológico, s.f.).

Las salas dedicadas a maquetas son especialmente importantes, dado que la gran ventaja de una buena maqueta es su carácter tridimensional y, por tanto, táctil, lo que es especialmente significativo en monumentos arquitectónicos que en no son, dado su tamaño, accesibles al tacto. La colección cuenta con un sistema de audioguías que facilita información del recorrido en dos niveles: uno básico, correspondiente con el recorrido táctil de la maqueta y un segundo nivel, que ofrece información sobre el estilo y la época del monumento (Museo Tiflológico, s.f.).

En la Sala de monumentos nacionales pueden apreciarse obras como las *Cuevas de Altamira*, la *Fuente de la Cibeles* o el *Acueducto de Segovia*; mientras que en la Sala de monumentos internacionales puede verse el *Taj Mahal*, el *Coliseo* o la *Estatua de la Libertad*.

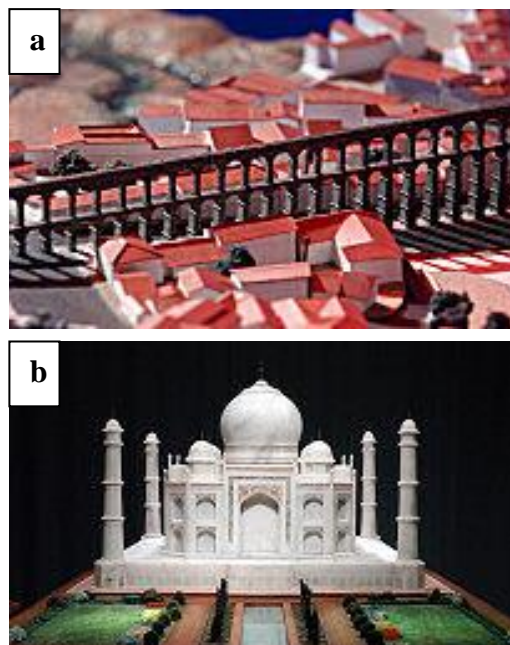


Fig. 283 a) Maqueta realizada por Andrés León Mora del *Acueducto de Segovia*; b) maqueta realizada por Chris Avramov del *Taj Mahal*. ©Museo tiflológico.

La mayoría de las maquetas han sido realizadas a mano con técnicas tradicionales, pero tal y como se espera, las nuevas tecnologías comienzan a emplearse en su realización. La última pieza que ha sido incluida en la sala de monumentos nacionales corresponde a la Catedral- Basílica de Nuestra Señora del Pilar de Zaragoza, el templo barroco más grande de España y uno de los más importantes del país junto con el de Santiago de Compostela.

La maqueta táctil reproduce el estado de conservación del original una vez restaurado en 2011. Se ha trabajado mediante modelado manual y con ayuda de impresora 3D y fresadora CNC a partir de un modelo 3D. Para su materialización se ha empleado una resina de poliéster especial resistente a golpes y deformaciones, reforzada con metal y fibra de vidrio. El armazón interior es de poliestireno extruido, muy ligero, espuma de poliuretano, madera de pino y tornillería inoxidable. Las cuatro torres y las once cúpulas de la cubierta superior son extraíbles, facilitando cualquier traslado o futura intervención sobre la maqueta (Maquetas Arsan, s.f.).



Fig. 284 Maqueta de la Basílica-Catedral de Nuestra Señora del Pilar: a) imagen del modelo 3D que muestra la vista general del monumento; b) maqueta instalada en el Museo Tiflológico; c) detalle de la Cúpula del monumento de la maqueta. ©Maquetas Arsan.

También en Madrid se encuentra el Museo Arqueológico Nacional (MAN), que en mayo del 2014 presentó su Programa de Accesibilidad para personas con discapacidad. Así, el 1 de abril el museo reabrió tras la remodelación que permitió incorporar importantes medidas destinadas a garantizar la accesibilidad y el cumplimiento de dicho programa, que permite a todos los visitantes recorrer las instalaciones del museo obteniendo la información sobre la colección gracias a la adopción de diversos recursos. La reformar más significativa fue el cambio en la entrada que permite el acceso al interior del Museo por la parte lateral del edificio a través de una escalera o bien una rampa de fácil recorrido para las sillas de ruedas. Por dentro, también se modificó la estructura arquitectónica con amplios ascensores y aseos adaptados.



Fig. 285 a) La imagen muestra la mano de un visitante tocando uno de los objetos de una estación táctil. ©Ministerio de Educación, Cultura y Deporte / Museo Arqueológico Nacional; b) Pictograma colocado en todas las estaciones que invita a los visitantes a tocar los objetos expuestos. ©M.^a Jesús Rubio Visiers y Dori Fernández Tapia.

La ONCE (Organización Nacional de Ciegos Españoles) y la Fundación CNSE (Confederación Estatal de Personas Sordas), creada para la supresión de las barreras de comunicación, así como la Fundación Orange han colaborado en el desarrollo y puesta en marcha del proyecto. Se han completado las guías multimedia a fin de mejorarlas para personas con discapacidad auditiva y que recogen 300 textos con imágenes, videos y subtítulos en español e inglés, con videos en lengua de signos. Las personas ciegas cuentan con el apoyo de 17 estaciones táctiles ubicadas a lo largo de la exposición permanente. En ellas se exponen reproducciones fieles de los objetos originales, relieves táctiles, modelos y mapas, que incluyen además textos en macrocaracteres y braille. Las explicaciones de estas estaciones son incluidas en una aplicación de la guía multimedia que permite completar la visita. El director del museo, Andrés Carretero, aseguró que el programa de accesibilidad se iría actualizando a medida que aparezcan nuevas tecnologías (Museo Arqueológico Nacional, 2014).

Empresas especializadas en realizar reproducciones, tales como El Romeral, Cerámica Creativa, Paleoscenic¹⁹ y Arqueoestudio, trabajaron en colaboración con el museo (Rubio y Fernández Tapia, 2014, p.579). No ha podido constatarse si algunas piezas han sido realizadas con tecnología 3D; aunque numerosas presentan características que así lo sugieren, al estar realizadas en diferentes materiales plásticos.

Otro ejemplo fundamental es *Hoy toca el Prado*, exposición temporal realizada en el Museo del Prado desde enero de 2015 hasta octubre del mismo año. El proyecto constituyó la primera iniciativa realizada por el museo, accesible a personas con discapacidad visual a través de la innovación y la tecnología (DIDÚ)²⁰. Gracias a esta



Fig. 286 En la imagen puede verse a un invidente tocando el cuadro de *La fragua de Vulcano*. ©Paula Arenas / 20minutos.es.

iniciativa, seis obras representativas de los diferentes géneros expuestos en el museo podían tocarse. Desarrollado con la colaboración de profesionales con discapacidad visual, este proyecto permite percibir la realidad de la pintura representada para recrearla mentalmente en su conjunto y lograr una percepción emocional de la obra. Además de las imágenes tridimensionales, la muestra contaba con material didáctico adicional como textos en braille, audioguías y gafas opacas de cartón para facilitar la experiencia de los videntes plenos (Museo del Prado, s.f. b). Recientemente, el Museo Pushkin de Moscú, la segunda pinacoteca más importante de Rusia, ha expuesto seis obras realizadas por la misma empresa y con la misma técnica que las realizadas para el Museo del Prado. En esta ocasión, la colaboración de Estudios Durero, Canon y el Museo Pushkin permite que obras de artistas tan conocidos como Gauguin, Picasso o Botticelli puedan ser apreciadas por aquellas personas con discapacidad visual que visiten el museo (Gráfica, 2017).

¹⁹ José Aurelio García Munúa de la empresa Paleoscenic afirma que las piezas son realizadas a mano con técnica tradicional y materiales originales como piedra, hueso, asta de ciervo o reno, piel, etc. (García munúa, J. A., comunicación personal vía e-mail, 16 de noviembre de 2016).

²⁰ La técnica empleada para su realización se denomina DIDÚ. Está patentada, por lo que no está publicado el sistema de producción. Sin embargo, Cristina Velasco, de estudios Durero (empresa dueña de la patente), afirma no emplear ninguna tecnología 3D para su producción (Velasco, C., comunicación personal vía telefónica, 7 de noviembre de 2016).

Por su parte, Tom Yeh, profesor adjunto de Ciencias de la Computación en la Universidad de Colorado, EEUU, junto a su equipo están impulsando el *CU-Boulder's Tactile Picture Books Project*, una colección de libros ilustrados táctiles para niños ciegos o con deficiencias visuales. Los libros son impresos en 3D para que puedan seguir el relato con el tacto y las ilustraciones que lo complementan. El primer libro de cuentos impreso ha sido *Goodnight Moon* de Margaret Wise Brown y 40 millones de ejemplares han sido ya vendidos y traducidos del inglés a una docena de idiomas (Imprimalia 3D, 2014).



Fig. 287 La imagen fue tomada en la exposición *Imprimiendo el Mundo* de la Fundación Telefónica y es la muestra de una de las páginas de un cuento en ella expuesta. Según afirma Tom Yeh, director del proyecto, los libros pueden ser personalizados con diferentes elementos y motivos, además de con diferentes textos en Braille, satisfaciendo así las necesidades culturales y de desarrollo de los niños. ©María Ávila Rodríguez / Tactile Picture Books Project.



Fig. 288 En la imagen de la izquierda pueden verse los cuentos táctiles y a la derecha diferentes páginas impresas. © Tactile Picture Books Project.

7. 4 Tecnología 3D aplicada en proyectos de divulgación, didáctica e investigación de bienes culturales

A continuación, se describen diferentes ejemplos clave con el fin de enfatizar la importancia que las tecnologías 3D tienen, tal y como se ha explicado a lo largo de esta

tesis, para los proyectos de divulgación, didáctica e investigación de bienes culturales. Los casos descritos a continuación han sido escogidos por tener como objetivo esencial esta divulgación, didáctica e investigación del patrimonio mediante el empleo de diversas tecnologías 3D, las cuales se han presentado como imprescindibles más que complementarias para desarrollar el proyecto correctamente. De este modo, gracias a estos ejemplos se posibilita la comprensión del alcance que estas herramientas presentan en el estudio del patrimonio, puesto que, sin ellas, los resultados y conclusiones obtenidos no serían los mismos.

El primer proyecto que a continuación se describe tuvo como objetivo esencial la anástilosis virtual de una estatua Arcaica griega, en este caso el *Kouros de Leontinoi*, citado ya en el cap. 5, con el fin de desarrollar un protocolo de alcance público que pueda servir como patrón para otras actuaciones. El proceso de la anástilosis virtual, descrito ya en el capítulo referente a la restauración virtual, fue realizado a partir de la cabeza de *Biscari* y el torso de *Leontinoi* de la estatua de mármol que se encuentran exhibidas cada una en un museo (Catania y Siracusa) desde sus descubrimientos. Su unión física, ampliamente debatida por investigadores, nunca se ha intentado, por lo que el público general no visualiza la lectura global de la obra y, por tanto, le restan valor e importancia.

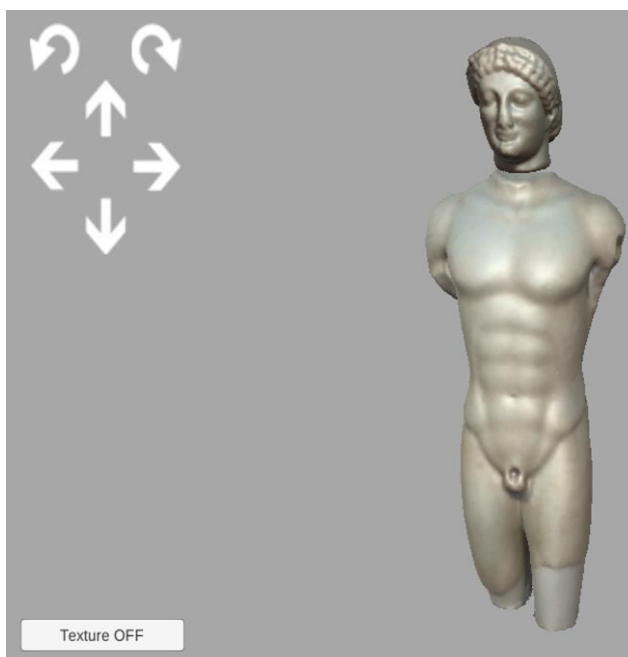


Fig. 289 Interfaz de la web para la interacción virtual con el *Kouros de Leontinoi*. ©Filippo Stanco Davide Tanasi Dario Allegra Filippo Luigi Maria Milotta Gioconda Lamagna & Giuseppina Monterosso.

De este modo, uno de los resultados del proyecto fue la creación de una plataforma web para el acceso del modelo al público. El objetivo principal de esta plataforma era proporcionar un entorno de visualización adecuado y de fácil manejo, en el que se pudiese navegar por la escultura con móviles, ordenadores y tabletas que tengan acceso a internet. Además, el archivo constituye un fiel documento del estado de conservación de ambas partes, de modo que servirá para monitorizar, transcurrido un determinado tiempo, su

deterioro. Por otro lado, los usuarios pueden involucrarse y formar parte del debate que la obra acarrea desde su descubrimiento.

La posibilidad de que la cabeza y el torso originales se recombinen y que el *Kouros de Leontinoi* se muestre en un solo museo parece bastante remota, al menos en un futuro próximo, por lo que la exitosa solución de compartir con el público el modelo digitalmente restaurado en una plataforma web, dejaba fuera de la experiencia a personas con discapacidades visuales y discapacidades cognitivas. Como solución se materializaron los dos archivos de la escultura a escala 1:10 con una impresora 3D FDM en



Fig. 290 A la izquierda aparece la impresión 3D de la cabeza y del torso de la estatua y a la derecha pueden verse ambas piezas unidas para formar el Kouros. ©Filippo Stanco Davide Tanasi Dario Allegra Filippo Luigi Maria Milotta Gioconda Lamagna & Giuseppina Monterosso.

PLA, y posteriormente se reensamblaron para devolver a la estatua su lectura completa. Por supuesto, el tacto de una escultura del s.VI a.C. y de su réplica polimérica no evoca las mismas sensaciones, pero manipularla sin riesgos de dañar el original es una oportunidad y una experiencia que no excluye el aprendizaje y disfrute. Aunque la conservación y la preservación sigue siendo una de las principales prioridades para la mayoría de los museos, la necesidad de que el público vea, toque y sienta el objeto de interés no debe ser subestimada, sobre todo por parte de invidentes.

La elección de la impresión tridimensional en escala y su restauración física constituye sin duda la mejor opción para que los museos de Catania y Siracusa muestren cómo era este ejemplo único de escultura griega. Además, en el caso del museo arqueológico de Siracusa, donde ya hay una colección táctil de artefactos que van desde la Prehistoria hasta el período griego, la réplica de los *Kouros de Leontini* representará otra

muestra de la colección para el público con impedimentos visuales. Con el fin de validar la experiencia sensorial de interactuar con el modelo tridimensional de la estatua reensamblada y compararla con la interacción directa del modelo impreso en 3D a escala 1:10, se realizó una prueba experimental mediante el empleo del dispositivo táctil Systems Touch 3D Stylus combinado con el software Geomagic Sculpt. En el experimento, un grupo de estudiantes debía interactuar con el modelo digital para posteriormente hacerlo con la impresión 3D, y finalmente describir la experiencia por medio de un cuestionario. Los resultados obtenidos con una prueba preliminar empleando una muestra muy limitada de estudiantes destacan claramente cómo el dispositivo háptico hace que la interacción con los modelos digitales sea más intensa. Desafortunadamente, aún no ha sido posible extender el experimento a una muestra más grande de estudiantes entre los cuales se incluyan aquellos con deficiencias visuales y discapacidades cognitivas, por lo que en un futuro la investigación deberá ampliarse (Stanco et al., 2017).



Fig. 291 A la izquierda puede verse la herramienta 3-D Systems Touch 3-D stylus y a la derecha una usuaria usándola para interactuar táctilmente con el modelo digital de la estatua. ©Filippo Stanco Davide Tanasi Dario Allegra Filippo Luigi Maria Milotta Gioconda Lamagna & Giuseppina Monterosso.

Por su parte *Project Mosul* es una iniciativa que integra el conocimiento arqueológico de sus creadores, Matthew Vincent y Chance Coughenour, con el desarrollo web y la fotogrametría, con el fin de promover la preservación digital de patrimonio cultural perdido (Project Mosul, s.f.). La mejor forma de comprender el alcance y la importancia de este proyecto es observando la intervención de Chance Coughenour (2016)

en *Tedx Talks*²¹, en la que explica el motivo por el cual estos dos arqueólogos decidieron unirse y trabajar en común empleando sus conocimientos en combinación con las nuevas tecnologías.

Coughenour habla en el video de Irak, un país devastado por las invasiones y dividido por la guerra civil, en el que la destrucción del patrimonio se había convertido, por desgracia, en una acción más que habitual. Los últimos años militantes del Estado Islámico se encargaron de la quema de numerosos libros de las bibliotecas y en febrero de 2015, las imágenes en las que podía vérselos destruyendo las obras más antiguas del Museo de Mosul dieron la vuelta al mundo (Ioannides, s.f.). En la emisión del video de cinco minutos el grupo terrorista se encarga de la destrucción con máquinas taladradoras, martillos hidráulicos o simples



Fig. 292 Destrucción del museo y la biblioteca de Mosul. ©AFP.

mazas, de esculturas de los s. IX y VII a.C. La directora general de la UNESCO Irina Bokova reconoció que estaba realmente muy conmovida por las imágenes emitidas y condenó el acto, que fue un ataque deliberado contra la historia y cultura milenaria de Irak, entre las que destacó la destrucción de las siete estatuas grandes de *Hatra*, una ciudad antigua al sur de Mosul considerada Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO desde 1985. El Museo de Mosul es, después del de Bagdad, el segundo más grande de Irak. Ya en 2003 durante la invasión de Estados Unidos algunas de sus galerías fueron saqueadas y la mayor parte de la colección fue trasladada tras la invasión. El museo había permanecido durante los 13 años previos cerrado, sin embargo, desde 2014 comenzó a ser atacado por los terroristas (Ruíz, 2015).

²¹ TED (Tecnología, Entretenimiento, Diseño, de la terminología anglosajona Technology, Entertainment, Design, es una organización sin ánimo de lucro dedicada a, tal y como su slogan indica "Ideas dignas de difundir" (ideas worth spreading). A partir de esta surge Tedx Talk, congresos organizados de manera independiente bajo la licencia exclusiva de TED. A la plataforma online acuden numerosos expertos, estudiosos o simplemente gente que tiene que algo decir y dan charlas sobre todo tipo de temas. Los videos son colgados en su página web y pueden verse gratuitamente (Ted, s.f.)

Solo un mes después, en marzo de 2015, también saquearon y demolieron con excavadoras la antigua ciudad asiria de Nimrod, 30 kilómetros al sureste de Mosul. La ONU calificó el acto de “limpieza cultural” y “crimen de guerra” (Espinosa, 2015).

De este modo, dos semanas después de la emisión del video que mostraba la destrucción del Museo de Mosul, Matthew Vincent se puso en contacto con Chance Coughenour para crear un proyecto hasta el momento sin precedentes. Puesto que ambos son arqueólogos conocen la técnica de la fotogrametría y decidieron pedir colaboración voluntaria a ciudadanos de todo el mundo, para recopilar fotografías de las obras destruidas por el terrorismo. Además, se están centrando en el desarrollo de una herramienta que les permite extraer imágenes de la web para completar las reconstrucciones. Empleando estas imágenes es posible obtener los modelos virtuales de obras cuyos originales fueron completamente destruidos y son imposibles de recuperar físicamente. Una vez dispusieron de los modelos virtuales pudieron imprimirlos. Los arqueólogos consideran que la impresión 3D es realmente útil para divulgar y mostrar estas obras, por lo que existen réplicas de estas obras desaparecidas originales, en tamaño reducido. Además, la revista *The Economist. Media Lab* se puso en contacto con los fundadores del proyecto para proponerles la creación de un museo virtual en el que situar estas reconstrucciones de las obras del Museo de Mosul (Coughenour, 2016). Desde entonces, miles de fotografías han sido subidas a la página web *Project Mosul* por gente del lugar, turistas e incluso algunos de los soldados estadounidenses que estuvieron en la zona durante la guerra de Irak (The Economist, 2016a).

En Youtube puede observarse un video 360° que se llama *RecoVR: Mosul, a collective reconstruction* en el que se explica la historia de este museo virtual y el espectador puede navegar por el museo a la vez que escucha al narrador. El vídeo puede visualizarse en 3D usando Google Cardboard VR u otros visores similares de bajo costo para experimentar el museo en realidad virtual. Moviendo el ratón por la pantalla o bien el dispositivo de reproducción (teléfono móvil, tableta, etc.) mientras el vídeo se reproduce, es posible mover el punto de vista y mirar hacia diferentes partes de la sala en una vista de 360° (The Economist, 2016b). A pesar de que ver el vídeo con el visor hace que la experiencia se enriquezca notablemente, puede también verse sin este; sin embargo, en este caso el espectador se moverá por el museo sin verlo en 3D y con una calidad algo difusa, puesto que el video ha sido grabado para ser visto con estos visores.



Fig. 293 En la imagen superior izquierda aparece el modelo 3D de la *Estatua de Hatra*, generado en PhotoScan Agisoft partiendo de las fotografías, en azul, que se han recopilado. A su derecha aparecen las impresiones 3D del *León de Mosul* y de la *estatua de Hatra*. La imagen inferior corresponde al museo virtual, donde puede verse la sala en la que aparece el *León de Mosul* expuesto. ©Chance Coughenour.

Los fundadores de *Project Mosul* rápidamente se dieron cuenta de la aportación que su trabajo había supuesto para el patrimonio de Mosul, decidiendo extrapolar sus investigaciones a otros casos de patrimonio mundial en los que las obras habían desaparecido. Decidieron entonces modificar el nombre del proyecto que pasó a llamarse, desde octubre de 2015, *Rekrei* (Coughenour, 2016; The Economist, 2016a). De este modo, actualmente se centra en el patrimonio perdido de diferentes partes del mundo. Por ejemplo, recientemente se han asociado con la empresa nFrames²² y juntos han estado trabajando en la reconstrucción del centro de la ciudad de Katmandú, Nepal, que quedó devastada desde que un terremoto la sacudió en abril de 2015 (Project Mosul, s.f.).

²² La empresa nFrames desarrolla softwares de fotogrametría para la realización de reconstrucciones 3D a partir de imágenes con un rendimiento y flexibilidad únicos. SURE es el Software que han diseñado y es tan simple como el cliente desee y a la vez todo lo avanzado que necesite, por lo que cuenta con múltiples interfaces y un diseño modular para satisfacer sus necesidades profesionales de cualitativa producción (Nframes, s.f.).

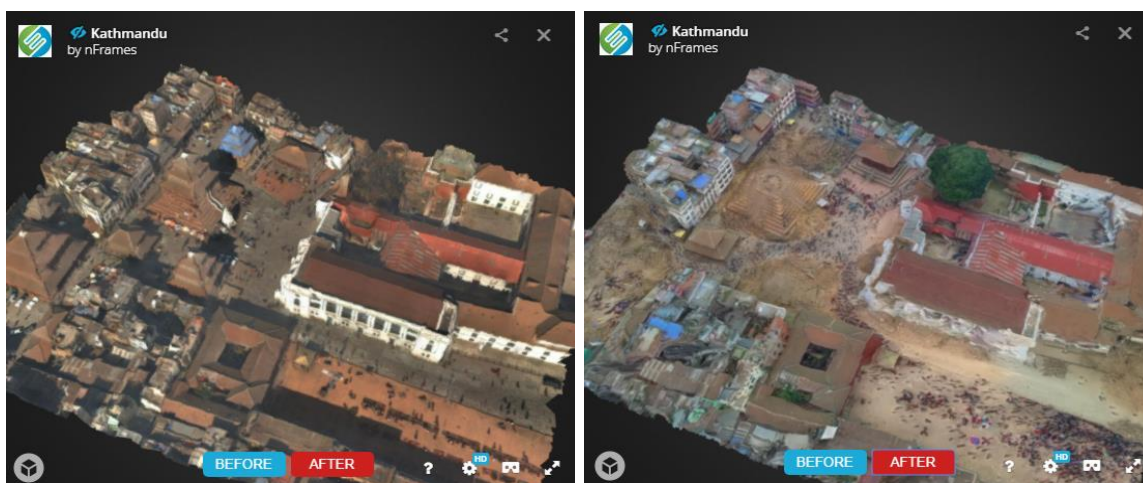


Fig. 294 Ambas imágenes hacen referencia al centro de la ciudad de Katmandú. A la izquierda la imagen muestra el centro de la ciudad antes de que ocurriese el terremoto, y a la derecha el estado en el que la ciudad y todos sus edificios quedaron. ©) Project Mosul.

Otro ejemplo es la reconstrucción 3D de una de las tumbas-torre de Palmyra, destruida de nuevo a manos del estado islámico en 2015. Usando Sketchfab, se puede ver la reconstrucción de las tres partes del exterior de la tumba, y puesto que existen fotos del interior, están empezando a crear una reconstrucción también de la pared y el techo. Numerosos arqueólogos han trabajado en la torre durante años, por lo que también existen planos arquitectónicos que son de gran ayuda en las reconstrucciones virtuales (Coughenour, 2016).

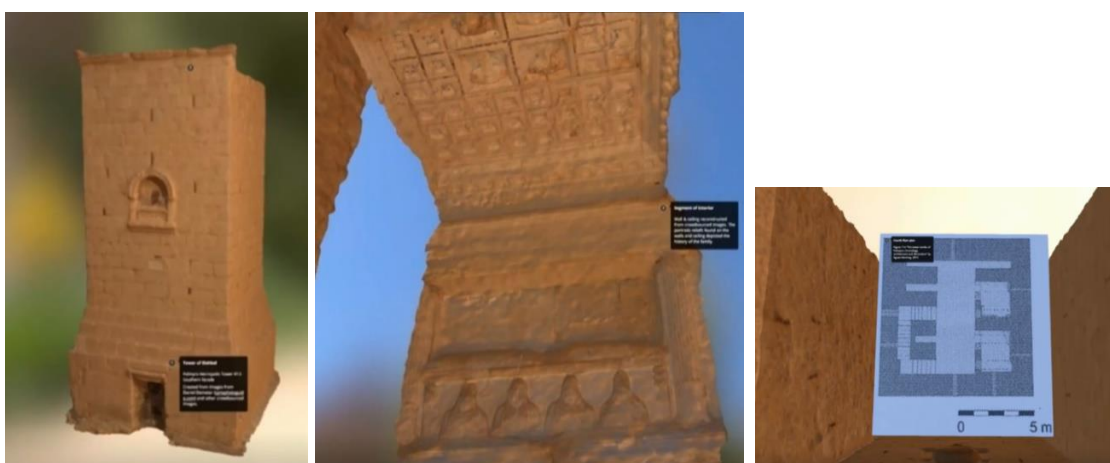


Fig. 295 La secuencia de imágenes muestra la tumba-torre de Palmira. En la primera imagen se ve la torre reconstruida, mientras que la siguiente la vista se ha posicionado en el interior, que está siendo reconstruido. Por último, si se sitúa la vista a modo de alzado puede verse el plano que se ha empleado para apoyar la creación del modelo, sobre el cual se han levantado los muros y estructuras de la torre. ©Chance Coughenour.

Si se entra en la página web del proyecto, aparece un mapamundi en el que pueden verse numeradas las obras en las que han trabajado. Seleccionando el lugar del que se quiere conocer más datos, es posible, descargarse el modelo creado, añadir un nuevo proyecto a partir de las fotografías de cada uno con el software SURE o bien añadir fotografías para que el proyecto continúe con la investigación y las reconstrucciones (Project Mosul, s.f.; Radio New Zealand, s.f.).

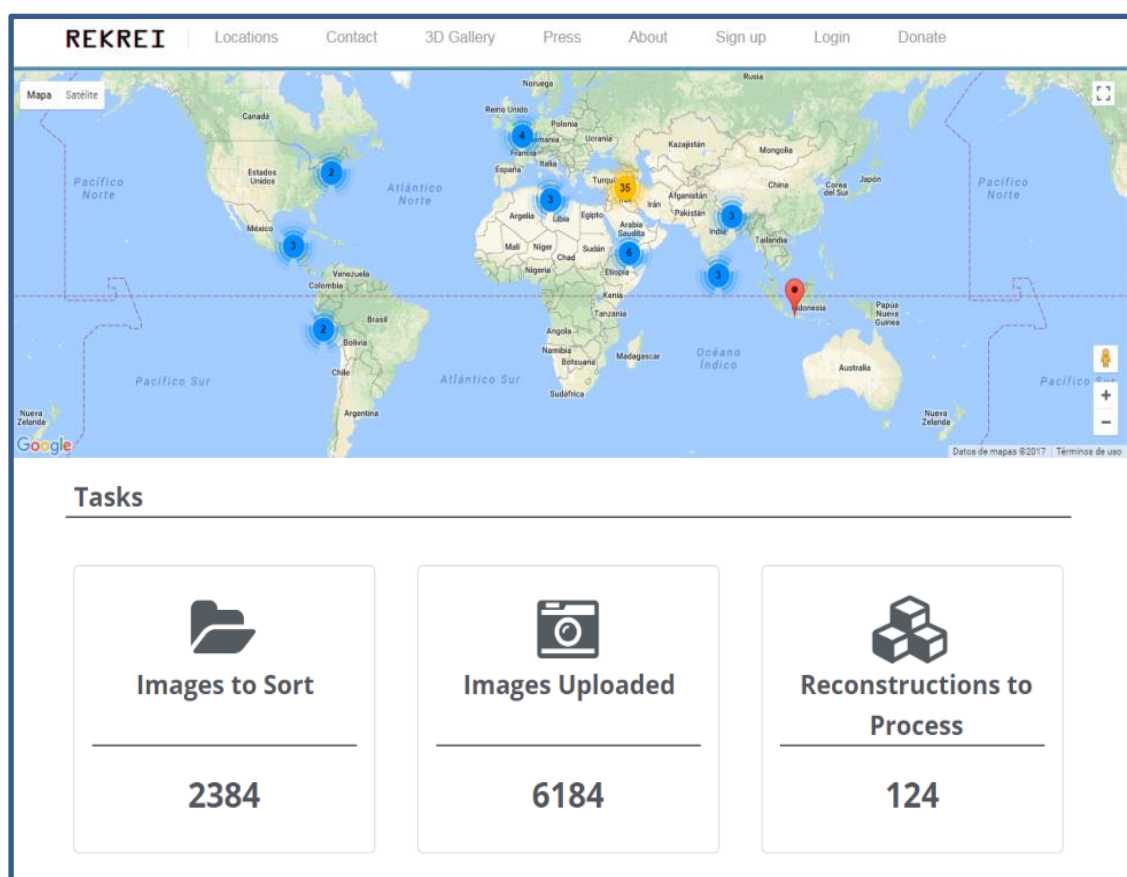


Fig. 296 Captura de pantalla de la página web del proyecto. ©Project Mosul.

Debe a su vez mencionarse en este capítulo la posibilidad de visualizar en alta resolución una gran cantidad de la documentación obtenida en el proceso de digitalización para la producción del Facsímil de la *Tumba de Tutankamón*, que Factum Arte desarrolló (ver capítulo 6).

Las visualizaciones emplean la tecnología OpenZoom²³, de modo que, a través del navegador, los usuarios pueden acceder a numerosa información de, por ejemplo, los muros de la tumba y observar a nivel macro con zoom los datos fotográficos obtenidos, visualizando los datos de color 2D y los referentes a la superficie 3D, en escala de grises. Además, por medio de una aplicación especializada, se permitirá a los especialistas dejar notas en áreas específicas deseadas, empleando un código de colores y visualizar archivos multicapas alternando aspectos visibles e invisibles (Factum Foundation, s.f.).

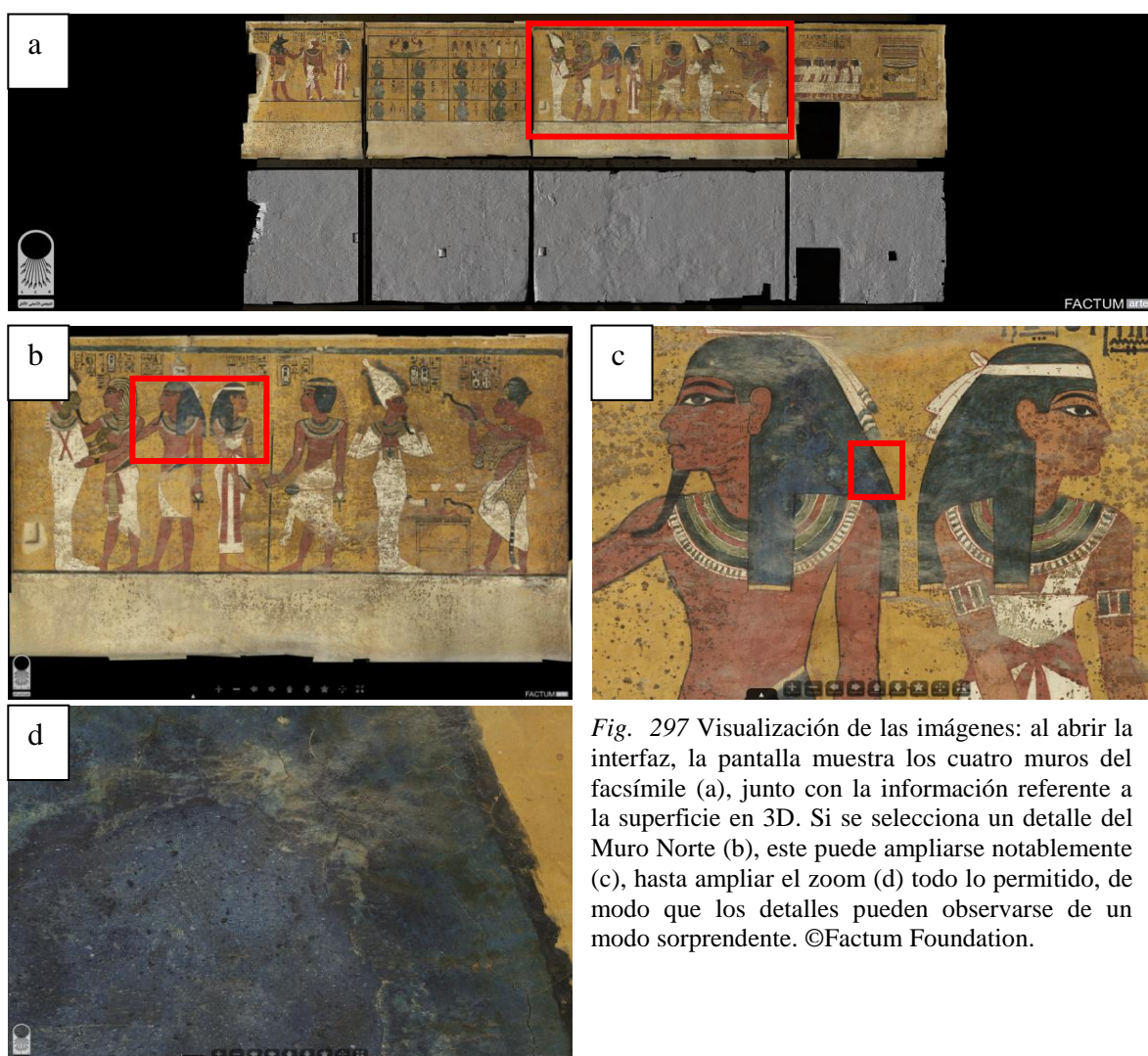


Fig. 297 Visualización de las imágenes: al abrir la interfaz, la pantalla muestra los cuatro muros del facsímil (a), junto con la información referente a la superficie en 3D. Si se selecciona un detalle del Muro Norte (b), este puede ampliarse notablemente (c), hasta ampliar el zoom (d) todo lo permitido, de modo que los detalles pueden observarse de un modo sorprendente. ©Factum Foundation.

²³ OpenZoom promueve el uso de imágenes de alta resolución para usuarios de interfaces en la web, ofreciendo kits de herramientas, utilidades y documentación con las que el usuario pueda interactuar.

Por su parte, en España el *Proyecto Atalaya* se ha encargado de la digitalización de diversos elementos del patrimonio cultural de universidades andaluzas, tales como la de Sevilla y Granada. Se han digitalizado 24 esculturas de las universidades de Sevilla y de Granada. La documentación obtenida ha sido insertada en un portal digital de patrimonio de las universidades andaluzas, donde los visitantes pueden acceder a las fichas perfectamente documentadas e ilustradas con fotografías y videos, así como al modelo 3D de las esculturas digitalizadas, además de navegar por el interior de las salas escaneadas (Jiménez, García, Revelles y Melero F, 2012, p.55).



Fig. 298 Imágenes del proyecto Atalaya. © Juan Gabriel Jiménez, Manuel García, Jorge Revelles y Fco. Javier Melero.

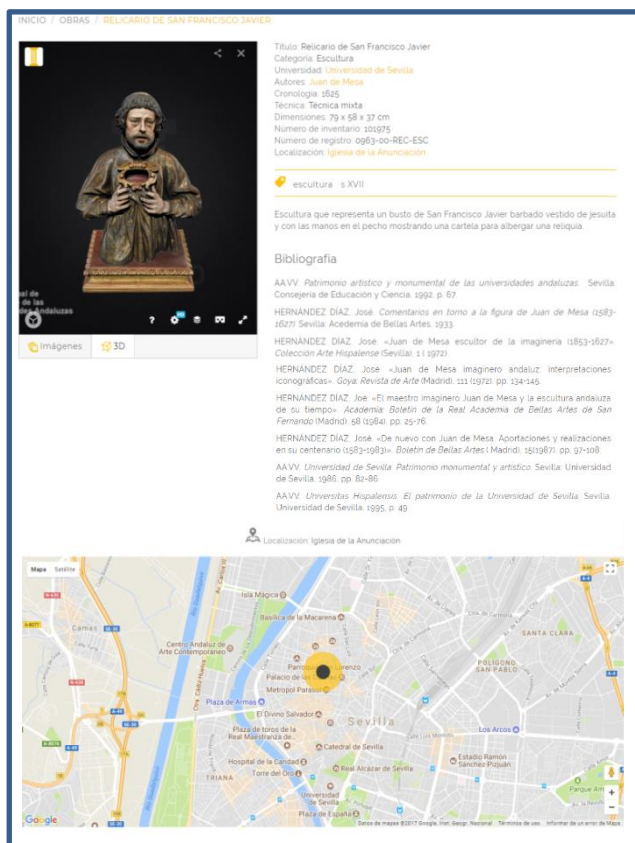


Fig. 299 En la imagen aparece la página web de proyecto Atalaya en la cual se ha seleccionado la obra documentada *Relicario de San Francisco Javier*. De la obra pueden verse fotografías o bien, tal y como fue seleccionado en este caso, el modelo 3D, sobre el que se puede navegar. En la página pueden verse además diversos datos de la obra, la bibliografía empleada en su documentación y en la parte final, se incluye un mapa de Google Maps en el que aparece localizada la obra, en este caso en la iglesia de la Anunciación de Sevilla. ©Atalaya 3D.

Como ejemplo del empleo de la tecnología 3D en las salas expositivas, se cita la exposición *Carlos III y la difusión de la Antigüedad*. La muestra itinerante fue celebrada en Nápoles, Madrid y Ciudad de México de diciembre de 2016 a marzo de 2017.

La exposición se centra en contar la historia del rey Carlos de Nápoles, que sería también rey de España, en el s. XVIII. El rey inició las primeras excavaciones, entre otras hasta ahora algo olvidadas, de los restos de las antiguas ciudades de Pompeya y Herculano. Las estatuas de mármol y bronce, extraídas de la roca volcánica solidificada en la erupción del Vesubio en el año 79 d.C., decoraron el nuevo palacio del rey en Portici y cuando este se llenó por completo se creó un museo. Al regreso de Carlos a España para convertirse en rey en 1759, ordenó hacer copias en yeso de todas las estatuas que habían descubierto para colocarlas en su palacio en Madrid. Finalmente, los moldes terminaron en la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando, donde sirvieron para que lo estudiantes se formasen dibujándolas, y otras fueron enviadas a México para servir a los mismos fines. Actualmente, la colección original de estatuas de mármol y bronce romano se conserva en el Museo Arqueológico Nacional de Napoli (MANN) y los moldes de yeso en la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando y en la Antigua Academia de Bellas Artes de San Carlos, por lo que el siendo el objetivo de la muestra mostrar las piezas originales y los yesos sin moverlos de sus lugares originales, fue necesario crear modelos 3D para tenerlas física o virtualmente en exhibición.



Fig. 300 a) Sala de la exposición de Carlos III en Madrid; b y c) ejemplo de visualizaciones de dos de las piezas digitalizadas que pueden verse a través de Sketchfab. ©Néstor F. Marqués. La imagen b) corresponde a una pieza que se encuentra en la Real Academia de las BBAA de San Fernando. ©Néstor F. Marqués / Real Academia de Bellas Artes de San Fernando. Por su parte la c) pertenece al Museo arqueológico nacional de Nápoles. ©Néstor F. Marqués / Museo Archeologico Nazionale di Napoli.

El resultado fue la muestra de cada una de las piezas junto a su correspondiente modelo 3D alojado en Sketchfab, mostrado en tabletas cedidas por la empresa bq, de modo que los visitantes podían interactuar con ellas. Todas las piezas digitalizadas están disponibles en 3D en Sketchfab (Marqués, s.f. b).

Para finalizar con esta serie de ejemplos de proyectos dedicados al estudio de las posibilidades de las tecnologías 3D en proyectos de divulgación, didáctica e investigación de bienes culturales, puede hacerse referencia a la Propuesta interactiva del Museo Pedagógico de Arte Infantil²⁴, MUPAI, de la Facultad de Bellas Artes de la Universidad Complutense de Madrid, que constituye un ejemplo muy interesante que aúna gran parte de las innovaciones anteriormente citadas.

El museo cuenta con un fondo recopilado a través de las experiencias y talleres realizados, así como la donación de obras de diversa procedencia, que son catalogadas como obras bidimensionales, tridimensionales o material audiovisual. En él se desarrollan actividades educativas, intercambio y colaboración con otras instituciones, exposiciones y talleres.

Durante los años 80 recibía grupos de escolares que realizaban diferentes actividades pedagógicas y artísticas, partiendo de las experiencias e investigaciones que desarrollaba el departamento. Desgraciadamente, las actividades fueron reduciéndose a medida que el espacio en el museo disminuía al albergar los despachos de los profesores, hasta convertirse el Museo en un mero contenedor de obras de arte infantil. Dada la carencia espacial y de personal físico acorde a las necesidades de un museo pedagógico, se vio la necesidad de crear un museo online (Cofán, s.f.).

M^a Fátima Cofán, del Departamento de Didáctica de la Expresión Plástica en la Facultad de BBAA de la UCM, examina en su tesis *Integración y difusión del museo a través de la red Internet* (2003) la implantación de la tecnología Web en el Museo. Como

²⁴ MuPAI se creó en la Cátedra de Pedagogía de la Facultad de Bellas Artes de Madrid en 1981 y supone un recurso pedagógico de primer orden para fomentar el interés de los niños por el mundo del arte, así como un lugar en donde las actividades que se realizan están enfocadas a la creatividad infantil a través de talleres y exposiciones. Constituye el primer museo dedicado especialmente al arte infantil y su pedagogía en España, teniendo al niño y adolescente como protagonista en cuanto creador artístico. El Museo cuenta con un grupo de investigación de la Universidad Complutense de Madrid validado como tal desde el año 2005, denominado Grupo de Investigación del Museo Pedagógico de Arte Infantil, GIMUPAI. Dicho grupo de investigación se dedica a labores de investigación sobre arte infantil, nuevas tecnologías, lenguaje visual, educación artística en ámbitos museísticos y hospitalarios.

objetivo principal de la tesis se estableció analizar los cambios que se originan en la educación al añadir la web como herramienta para la información, comunicación y formación en el aula. Analiza de este modo cómo la implantación de una website en el MUPAI constituye un recurso adicional del proceso educativo, dado que, entre muchas otras ventajas, aporta motivación, requiere interacción y anima a una participación y una colaboración más activas. En cierto modo, la tesis de Daniel Zapatero Guillén (2007), profesor asociado de la Facultad, continúa en 2007 esta investigación.

El proceso de virtualización de los fondos del museo se llevó a cabo mediante escáner 3D y a lo largo del proceso de emplearon los softwares 3D Studio max y Rapidform, junto con Dreamweaver, Cortona y VRMLPad. Los resultados obtenidos fueron enteramente satisfactorios (Zapatero, 2007, p.294-300).

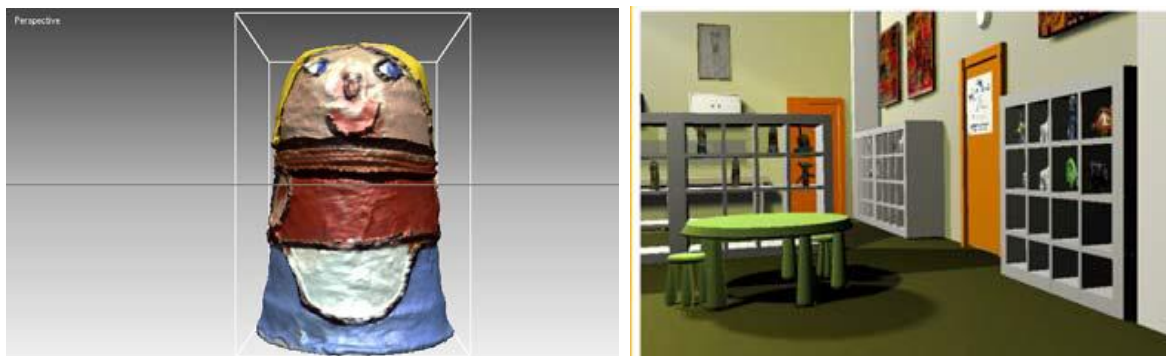


Fig. 301 La imagen de la izquierda muestra el modelo 3D visualizado de una de las obras digitalizadas, mientras que a la derecha puede verse una de las perspectivas del MUPAI Virtual 3D. ©Daniel Zapatero Guillén

Capítulo 8. Legislación y normativa de patrimonio

La conservación, protección y la puesta en valor del patrimonio cultural constituye un reto de innovación tecnológico y profesional, que exige un esfuerzo por crear y desarrollar instrumentos de gestión adecuados y productos de nueva generación (Grande, 201, p.7). Y precisamente que este reto sea abordado de manera adecuada ocupa y preocupa cada vez más a distintos profesionales y estamentos administrativos (González-Varas, 2008, p.15), por lo que las normativas y leyes referentes a patrimonio son cada vez más numerosas. Por ello, el patrimonio cultural cuenta con un complejo sistema de protección que se ha ido consolidando en las normas jurídicas que lo definen y lo protegen a partir de concretas pautas de intervención, fruto del consenso de la Comunidad Internacional (Gómez, Quirosa y Fernández Ruiz, 2010).

8. 1 Introducción

A lo largo de la historia, ha existido una clara relación entre el arte y el derecho que se ha encargado de regular diversos aspectos como el coleccionismo y las intervenciones sobre las obras, conviviendo en la regulación jurídica los intereses públicos y privados, pero con una clara inclinación hacia el interés público y nacional. Los primeros ejemplos jurídicos de la antigüedad que pueden citarse se remontan a la época del emperador romano Constantino (272 d.C. - 337 d.C.) en la que aparecen una serie de reglamentaciones por las que las riquezas artísticas debían inventariarse. Por su parte, en época de Adriano, los textos de Gayo hablan no solo sobre la tipificación del robo, sus formas y sanciones, sino que también abordan otros daños como la quemadura, fractura y rotura de las obras (Macarrón, 2013, pp.43 y 44).

Siguiendo con esa línea que pretende regular que las intervenciones efectuadas sobre el patrimonio cultural sean desarrolladas de manera adecuada en cuanto al punto de vista ético y a los materiales y metodologías empleados, también la aplicación de las tecnologías 3D a este ámbito exige su regulación.

Que estas tecnologías suponen un gran avance en algunos de los aspectos que incluye la conservación de bienes culturales es indiscutible por la gran mayoría de profesionales; sin embargo, el sinfín de posibilidades que plantean exige un nuevo estudio en profundidad, siendo ineludible el planteamiento de un debate teórico de sus implicaciones prácticas. Este permitiría a los gestores del patrimonio aprovechar lo mejor de las nuevas tecnologías y minimizar sus aplicaciones más controvertidas. En definitiva, urge establecer unos principios básicos que regulen las prácticas que con las nuevas tecnologías han surgido. Innegable es también la necesidad imperante de encontrar un documento cuyas recomendaciones sirvan de base a la hora de diseñar los nuevos proyectos del ámbito del patrimonio cultural, así como plantear nuevas recomendaciones y guías adaptadas a las necesidades específicas de cada rama del saber y comunidad de expertos (López-Menchero, 2011, pp.65 y 66). Fue durante el s. XIX, como respuesta a una creciente preocupación social e institucional por la salvaguarda del patrimonio, cuando se consolidaron las primeras medidas jurídicas para la protección de los monumentos y obras de arte. Sin embargo, estas medidas se limitaban inicialmente a ordenamientos jurídicos y administrativos de las distintas naciones y no es hasta principios del s. XX cuando se toman las primeras medidas de carácter internacional por medio de la Carta de Atenas, escrita en 1931. Así, a partir de los problemas de este primer documento y como consecuencia del progresivo aumento de la toma de conciencia internacional ante los problemas del patrimonio cultural, comienzan a sucederse cada vez con mayor frecuencia, y muy especialmente en los tres últimos decenios del s. XX, los textos de carácter internacional (González-Varas, 2008, p.466). Las Cartas del Restauo son fundamentales para el estudio del patrimonio, sin embargo, en este capítulo, dado el objeto de estudio de esta tesis, la atención va a centrarse en las cartas que tratan sobre documentación, conservación y restauración. Estas constituyen documentos estructurados a partir de unas declaraciones de intenciones, organizados mediante artículos que establecen criterios y pautas sobre como intervenir en el ámbito de la conservación y la restauración. A pesar de ser textos normativos, no pretenden establecer un código cerrado que resuelva cada uno de los interrogantes que en el proceso de intervención de un determinado bien cultural

puedan surgir. Constituyen un marco general orientativo puesto que cada intervención constituye un caso único en sí mismo (González-Varas, 2008, p.434).

Por su parte, se considera imprescindible la creación y organización de instituciones internacionales, concretamente tras las II Guerra Mundial, que tuvieron y tienen un alcance de gran importancia en los campos de la educación, cultura y patrimonio. Estas organizaciones se esfuerzan en la regulación de efectivas medidas de tutela y de acción internacional y en la elaboración de textos jurídicos y recomendaciones internacionales, que en los últimos decenios se han visto incrementados (González-Varas, 2008, p.457). Surgieron de este modo las primeras cartas del restauro con el objetivo de dictar pautas y recomendaciones que guiasen a los profesionales en sus intervenciones ante la ya mencionada falta de normativas del momento.

De la primera carta cabe destacar, como ya en su primer punto expresa, que la Conferencia entendía que la conservación del patrimonio artístico y arqueológico de la humanidad era del interés de todos los Estados defensores de la civilización, por lo que éstos debían prestar recíprocamente una colaboración para favorecer la conservación de los monumentos artísticos e históricos. En la misma dirección, estimaba que la mejor garantía de conservación de monumentos y obras de arte parte del afecto y del respeto del pueblo, sentimientos que pueden ser favorecidos con apropiadas acciones de las instituciones públicas con las que los educadores podían colaborar habituando a la infancia y a la juventud no solo a abstenerse de actos que pudieran deteriorar los monumentos, sino que también podían inducirles al entendimiento de su significado (Carta de Atenas, 1931).

De este modo, se verá a lo largo del capítulo como a pesar de la existencia aún de vacíos legales en lo que al uso de estas tecnologías en patrimonio respecta, puesto que son tan recientes que aún no se han actualizado determinadas leyes vigentes, las cartas y demás documentos comienzan a actualizarse, implementando numerosas recomendaciones sobre cómo hacer buen uso de estas tecnologías.

Actualmente, el principal organismo internacional que se ocupa del patrimonio cultural es la UNESCO (United Nations Educational Scientific and Cultural Organization) y sus organismos dependientes, tales como el ICOMOS (International Council on Monuments and Sites, Consejo Internacional de Monumentos y Sitios) y el OCPM (Organization of World Heritage Sites, Organización de las Ciudades del Patrimonio Mundial).



Fig. 302 Logo de la Unesco en español. ©Unesco.

Sin embargo, dadas las nuevas formas de trabajar en el ámbito patrimonial, comienzan a nacer asociaciones e instituciones que buscan ayudar a los profesionales del patrimonio a desenvolver sus tareas y actuaciones del mejor modo posible. CAA, Computer Applications & Quantitative Methods in Archaeology, citada en anteriores capítulos, es una organización internacional que reúne a arqueólogos, matemáticos e informáticos con el objetivo de fomentar la comunicación entre estas disciplinas (Caa, s.f.). Organizan anualmente una conferencia científica internacional donde se tratan, entre otros aspectos, la adquisición y registro de datos, el modelado y las tecnologías 3D y la reconstrucción digital de objetos en 3D (Caa, s.f.).



Fig. 303 Logo Computer Applications & Quantitative Methods in Archaeology. © Logo Computer Applications & Quantitative Methods in Archaeology

Actualmente el grupo se denomina CIfA (Chartered Institute for Archaeologists) y es el organismo profesional líder en la representación de los arqueólogos que trabajan en el Reino Unido y en el extranjero. Actúa como el organismo autorregulador de la profesión arqueológica, puesto que ha desarrollado una gama de regulaciones, estándares y pautas que son vinculantes para todos los miembros y organizaciones registradas con el fin de asegurar que los miembros de CIfA trabajen dentro de los estándares éticos y profesionales (Cifa, s.f.).



Fig. 304 Logo de Chartered Institute for Archaeologists. ©CIfA.

En España, la SEAV, Sociedad Española de Arqueología Virtual, es una asociación que tiene por objeto agrupar a todos los usuarios e interesados en la informática gráfica aplicada a la Arqueología Virtual con el fin de aunar y coordinar los esfuerzos tendentes a su investigación, desarrollo y difusión del patrimonio arqueológico virtual en España. Para



Fig. 305 Logo de Sociedad de Arqueología Virtual. ©Seav.

ello organiza congresos, cursos, conferencias, reuniones, publicaciones, viajes y contactos con otras asociaciones y clubes de similares fines, así como otras actividades de este tipo (Seav, 2008).

La INNOVA (Virtual Archaeology International Network, Red Internacional de Arqueología Virtual), es una sociedad filial internacional de la SEAV que nace con la intención de integrar a todos los grupos de investigación universitarios, centros de investigación, instituciones, empresas y profesionales que así lo deseen, en una comunidad de excelencia, que ratifique y siga los preceptos de los Principios de Sevilla, y la Carta de Londres (Innova, 2012) que más adelante serán también descritos y revisados.



Fig. 306 Logo Virtual Archaeology International Network. ©Innova.

Por su parte, la UNESCO ha impulsado la puesta en común a nivel mundial de las aplicaciones de las nuevas tecnologías al patrimonio cultural mediante conferencias y publicaciones como *The World Heritage Newsletter* y en 2003 se publicó La Carta UNESCO para la preservación del patrimonio digital (Gómez, Quirosa y Fernández Ruiz, 2010).

Por ello, a lo largo de este capítulo serán revisados y comentados algunos de los documentos hasta hoy existentes que traten estos detalles referentes a la documentación, conservación y restauración del patrimonio, siendo también necesario adaptar los anteriores textos a las posibilidades que en la actualidad han surgido. Entre los documentos más relevantes que serán revisados, cabe destacar la Ley de Propiedad Intelectual (LPI22/1987 de 11 de noviembre), de ahora en adelante LPI y, como ya se ha indicado, las diferentes Cartas del Restauo.

Las Cartas del Restauro se presentan fundamentales puesto que la amplísima mayoría de especialistas del mundo de la conservación y restauración del patrimonio siguen sus recomendaciones hasta el punto de ser incluidas en los temarios de formación de estos profesionales, valorándose por tanto muy notablemente sus normas y dictámenes, que en ocasiones son más claras y sencillas de comprender que las propias leyes estatales y autonómicas.

Además de las normativas y leyes de patrimonio relacionadas con las tecnologías 3D, se revisarán valores éticos, puesto que el empleo de estas técnicas no está exento de polémicas y en ocasiones los vacíos legales existentes requieren ser comentados y valorados. De este modo, se irán desglosando y comentando diferentes leyes y normas que se consideren relevantes para el ámbito que atañe al presente estudio.

8. 2 Revisión de las leyes y cartas referentes a las diferentes aplicaciones de la tecnología 3D en el ámbito patrimonial

Como introducción al resto de leyes y cartas, debe hacerse referencia a la Ley 16/1985 del Patrimonio Histórico Español (LPHE), que se encarga de la regulación del patrimonio histórico-artístico. La LPHE constituye el marco legal más amplio para el tratamiento de los bienes culturales de España y remplazó a su predecesora, la Ley de Protección del Tesoro Artístico Nacional de 1933. De este modo, la LPHE comienza a ser elaborada tras la promulgación de la Constitución Española de 1978, siendo publicada en el Boletín Oficial del Estado el 29 de junio de 1985 (González-Varas I., 2008, p.517).

En su artículo primero, se especifica que la LPHE tiene por objetivos proteger, acrecentar y transmitir a las generaciones futuras el Patrimonio Histórico Español. Este se encuentra integrado por los inmuebles y objetos muebles de interés artístico, histórico, paleontológico, arqueológico, etnográfico, científico o técnico; el patrimonio documental y bibliográfico, los yacimientos y zonas arqueológicas y los sitios naturales, jardines y

parques, que tengan valor artístico, histórico o antropológico (Artículo 1.1 y 1.2 LPHE, 1985).

Sin embargo, ha de esclarecerse que las Comunidades Autónomas, que han redactado su propia legislación sobre la protección del patrimonio histórico a través de sus Estatutos, han asumido las competencias sobre el patrimonio cultural, artístico, monumental, arqueológico y científico, los museos, bibliotecas, archivos y conservatorios de música y fomentan la cultura y la investigación.

La Constitución Española declara competencia exclusiva del estado defender el patrimonio cultural artístico y monumental español contra la exportación y expoliación sin perjuicio de su gestión por parte de las Comunidades Autónomas. De este modo, el texto afirma que las competencias corresponden a las Comunidades Autonómicas para los bienes integrantes de su patrimonio, quedando bajo responsabilidad directa de la Administración General del Estado aquellos bienes del PHE adscritos a los servicios públicos gestionados por la Administración del Estado o bien que formen parte del Patrimonio Nacional¹¹⁶ (González-Varas, 2008, pp.525 y 526; Mecd, s.f.).

8. 2. 1 Los derechos de autor

Uno de los primeros puntos que debe tratarse en este capítulo constituye los derechos de autor. Comprenderlos es fundamental siempre que se va a intervenir o se van a tratar temas relacionados con el patrimonio, puesto que actuar dentro y conforme a la legalidad vigente debe ser el fin de todo profesional. De este modo, a continuación, se procede a la revisión de determinados aspectos de LPI.

Para comenzar, debe entenderse que según establece la LPI (1987), “la propiedad intelectual de una obra literaria, artística o científica corresponde al autor¹¹⁷ por el solo hecho de su creación” (art.1) y, se considera que “son objeto de propiedad intelectual todas

¹¹⁶ El Patrimonio Nacional es una parte específica del PHE y está integrado en los bienes de la Casa Real Española. Este patrimonio está regulado por la Ley 23/1982 y por su reglamento de 1987 y González-Varas, 2008, p.52).

¹¹⁷ Se considera autor a la persona natural que crea alguna obra literaria, artística o científica (art. 5.1 LPI, 1987).

las creaciones originales literarias, artísticas o científicas expresadas por cualquier medio o soporte, tangible o intangible, actualmente conocido o que se invente en el futuro” (art. 10).

Por su parte, los derechos que componen el derecho de autor¹¹⁸ se agrupan en el capítulo III (Artículos 14 hasta el 25) de la LPI (1987) en tres secciones:

- Sección 1ª: Derecho moral por el cual corresponde al autor, de un modo irrenunciable e inalienable, decidir si su obra ha de ser divulgada¹¹⁹ y en qué forma, con su nombre, bajo seudónimo o anónimamente; exigir el reconocimiento de su condición de autor de la obra y el respeto a la integridad de la misma e impedir cualquier deformación, modificación, alteración o atentado contra ella que suponga perjuicio a sus legítimos intereses o menoscabo a su reputación. Con el fallecimiento del autor, el ejercicio de exigir estos derechos corresponde, sin límite de tiempo, a la persona natural o jurídica a la que el autor se lo haya confiado expresamente por disposición de última voluntad. En su defecto, el ejercicio de estos derechos corresponderá a los herederos. En relación con la obra no divulgada en vida de su autor y durante un plazo de setenta años desde su muerte, las mismas personas señaladas en este párrafo podrán decidir si la obra ha de ser o no divulgada, así como el modo de hacerlo. En caso de no existir esas personas, el Estado, las Comunidades Autónomas, las Corporaciones locales y las instituciones públicas de carácter cultural estarán legitimados para ejercer estos derechos (art. 14, 15 y 16).
- Sección 2ª: Derechos de explotación, por los que se otorga al autor el ejercicio exclusivo de los derechos de explotación de su obra y, en especial, los derechos de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación, que salvo excepciones no podrán ser realizadas sin su autorización (art. 17).

¹¹⁸ Para que una obra goce de la protección que estos derechos de autor otorgan, ésta ha de reunir dos características: Originalidad y expresión formal (Espín, 1996, p.65).

¹¹⁹ Ya en la Carta de Atenas de 1931 puede verse como la decisión de usar la obra en ámbito un privado o por el contrario, público, acarrea discrepancias y debate. La Conferencia constataba que la diferencia existente en el momento entre las legislaciones promulgadas en cada país procedía de la dificultad existente a la hora de conciliar el derecho público con el derecho privado y proponía que la Oficina Internacional de Museos Públicos realizase una comparativa de las legislaciones vigentes en los diferentes Estados sobre este tema (Carta de Atenas, 1931).

- Sección 3ª: Otros derechos, que vienen a ser el derecho de participación, actualmente derogado¹²⁰ y el de compensación equitativa por copia privada (art. 24 y 25), que será revisado en próximos apartados.

Los derechos de explotación de la obra deben revisarse en profundidad puesto que son fundamentales para emplear correctamente las aplicaciones que la tecnología 3D presenta para el ámbito del patrimonio.

Los derechos de explotación habilitan al autor o al titular que los haya adquirido (mediante una cesión de derechos) a poder reproducir, distribuir, comunicar públicamente y/o transformar la obra (art. 18, 19, 20 y 21). El derecho de reproducir las obras permite realizar tantas copias como se desee y constituye el derecho base de los derechos de explotación ya que, a partir del ejercicio del derecho de reproducción es posible, por ejemplo, hacer una distribución pública de la obra. El derecho de distribución es aquel que permite distribuir dichas copias, mediante la venta, el alquiler, el préstamo o a través de cualquier otra forma similar. Este derecho se agota o extingue con la primera venta, por lo que, si posteriormente se revende la obra el comprador no habrá que pagar nada al autor por ello. Respecto al derecho de distribución por alquiler o préstamo, éste no se agota ya que, la cesión del derecho de distribución, en estos casos, se realiza por tiempo limitado. El derecho de comunicación hace accesible la obra al público sin tener que transmitirla, diferenciándose así del derecho de distribución. El derecho de transformación es el que consiste en poder modificar una obra en tal medida que pueda derivarse o crearse una obra nueva a partir de la inicial. En estos casos, el autor de la obra generada a partir de la originaria, será el que la haya transformado y, por tanto, el que haya obtenido la obra nueva, mientras que los derechos de la obra originaria continúan perteneciendo a su autor (Muñoz, 2014).

La transmisión de los derechos de explotación¹²¹ puede llevarse a cabo por numerosos motivos: se transmiten *mortis causa* por cualquiera de los medios admitidos en derecho. Pueden transmitirse por actos *inter vivos*, quedando limitada la cesión al derecho o derechos cedidos, a las modalidades de explotación expresamente previstas y al tiempo y

¹²⁰ El derecho de Participación corresponde a los creadores o a sus derechohabientes y les permite participar económicamente en el precio que alcanzan sus obras cuando éstas se revenden, si en dicha reventa interviene como vendedor, comprador o intermediario, un profesional del mercado del arte. Sin embargo, la Ley 3/2008, de 23 de diciembre, que regula el Derecho de Participación entró en vigor el miércoles 14 de enero de 2009 y derogó el artículo 24 de la LPI (Vegap, s.f.).

¹²¹ La transmisión de los derechos aparece en las disposiciones generales del Capítulo I (art. 42 al 57, LPI, 1987).

ámbito territorial que se determinen, en caso de no ser mencionados, el tiempo de transmisión queda limitado a cinco años y el ámbito territorial al país en el que se realice la cesión. Es importante destacar que la transmisión de los derechos de explotación no alcanza a las modalidades de utilización o medios de difusión que aún no sean conocidos en el tiempo de la cesión (art. 42 al 44, LPI, 1987).

Siempre que se realice una cesión, deberá formalizarse por escrito y concediéndosele al autor a título oneroso¹²², una participación proporcional, convenida con el cesionario, en los ingresos de la explotación; o bien podrá estipularse una remuneración a tanto alzado y si en esta última se produjese una manifiesta desproporción entre la remuneración del autor y los beneficios obtenidos por el cesionario, el autor podrá pedir la revisión del contrato dentro de los diez años siguientes al de la cesión (art. 45, 46 y 47, LPI, 1987).

Existe la posibilidad de otorgarse expresamente una cesión en exclusiva que atribuye al cesionario la facultad de explotar la obra con exclusión de cualquier otra persona, comprendido el propio cedente y, salvo pacto que exija lo contrario, las de otorgar autorizaciones no exclusivas a terceros. Por su parte, el cesionario no exclusivo podrá utilizar la obra de acuerdo con los términos de la cesión (art. 48 y 50, LPI, 1987).

La transmisión de derechos a los propietarios de ciertos soportes materiales supone que el adquirente de la propiedad del soporte a que se haya incorporado la obra no tendrá ningún derecho de explotación. Por su parte el propietario del original de una obra de artes plásticas o bien fotográfica tendrá el derecho de exposición pública de la obra, salvo que el autor lo dictase expresamente en el acto de la venta. Además, el autor podrá oponerse al ejercicio de este derecho cuando la exposición se realice en condiciones que perjudiquen su honor o reputación profesional (art. 57, LPI, 1987).

Esta transmisión de derechos es algo complicada de entender, y, en consecuencia, de legislar, por ello existen insuficiencias legales ante las cuales la jurisprudencia ha tenido que aplicar criterios derivados de los derechos reconocidos al propietario de la obra y al autor para conseguir la difícil conciliación entre ambas partes. Un ejemplo constituye el caso, ocurrido con anterioridad a la creación y aprobación de la LPI, de la escultura *Viaje a la luna en el fondo del mar*. Su escultor Pablo Serrano reclamó una indemnización cuando el propietario de la escultura la desmontó del lugar de emplazamiento para el que fue

¹²² Título que supone recíprocas prestaciones entre los que adquieren y transmiten (Rae, s.f.).

encargada: el hall de un hotel en Torremolinos. La obra estuvo en dicho hall instalada; sin embargo, al poco tiempo de encontrarse en esa ubicación, la empresa propietaria, alegando que la obra contrastaba con la decoración del hotel puesto que no se ajustaba al boceto escogido, la desmontó y guardó sus elementos componentes en un almacén (Espín, 1996, pp.97 y 98). Se produjo entonces un litigio entre la sociedad del hotel y el artista, que ante su negativa de instalarla en otro sitio puesto que la había diseñado para ese lugar concreto, la escultura se mantuvo finalmente desmontada y almacenada. La peculiaridad del caso reside en el hecho de que se tuvieron en cuenta tanto los derechos del autor como del propietario (Santos, 2016, p.18).



Fig. 307 El escándalo del *Viaje a la luna en el fondo del mar* de Torremolinos. ©La opinión de Málaga.es.

Como ha podido observarse, la propiedad intelectual, los derechos morales de una obra literaria, artística o científica corresponde al autor por el sólo hecho de su creación. Respecto a los materiales accesibles a través de la red, estos se pueden leer, ver u oír gratuitamente si así lo ha decidido su autor, sin embargo, no pueden nunca ser copiados, ni redistribuirlos sin su autorización. Al digitalizar el patrimonio se está obteniendo una copia de un objeto protegido por el Copyright, por lo que para copiar y distribuir las obras se requiere el permiso de la persona que tiene los derechos de reproducción (Weinberg, 2013 citado en De la Torre-Cantero, Saorín, Meier, Melián-Díaz y Drago-Díaz, 2015, p.432).

En la actualidad, la sociedad creada en 1990 por el Ministerio de Cultura denominada Visual Entidad de Gestión de Artista Plásticos (Vegap), organización sin ánimo de lucro, gestiona los derechos de propiedad intelectual, sobre todo de explotación, de los creadores visuales de todas aquellas obras expresadas mediante imágenes. La sociedad se encarga también de gestionar los derechos morales de aquellos autores que se lo encomiendan, de la concesión de autorizaciones para la utilización de las obras, de establecer las tarifas aplicadas para esta utilización y de la recaudación y reparto de las mismas para autores y herederos de

las obras. La organización cobra un porcentaje de la cantidad que los socios obtienen mediante el ejercicio de los derechos de explotación de modo que puede así mantenerse económicamente. Por su parte, la Unión de Asociaciones de Artistas Visuales (AAV) representa a unos 3500 artistas. Esta asociación representa, defiende y promociona los intereses económicos, sociales, profesionales y culturales de los artistas visuales (Santos, 2016, p.19).

8. 2. 2 Documentación del patrimonio cultural

Indudable es hoy en día que documentar el patrimonio es importantísimo no sólo como acto de conocimiento del mismo sino por el hecho de que conlleva a su vez un análisis más exhaustivo de sus valores patrimoniales. Sin embargo, en este indispensable acto de protección y conservación del bien, pocos han sido los mecanismos utilizados, basados prioritariamente en la realización de catálogos e inventarios, primando una información muy esquemática. Además, las nuevas categorías patrimoniales requieren otros mecanismos o bien la modificación de los existentes para que puedan adaptarse a sus diversos valores patrimoniales (Gómez, Quirosa y Fernández Ruiz, 2010). Entre esos nuevos mecanismos de documentación pueden incluirse las tecnologías 3D. Es esta, verdaderamente, una de las aplicaciones más importantes de su empleo, puesto que:

Al igual que en la excavación, también en la restauración de monumentos debe ser condición esencial y taxativa que una documentación precisa acompañe los trabajos mediante informes analíticos recogidos en un diario de restauración e ilustrados con dibujos y fotografías. (Carta Italiana, 1932)

A su vez, la Carta de Venecia (1964) establece que “esta documentación se depositará en los archivos de un organismo público y estará a disposición de los investigadores”. (art. 16)

En 1931 La Carta de Atenas exigía que todos los Estados o las instituciones reconocidas como competentes para tal fin publicasen un inventario de los monumentos históricos nacionales, acompañado por fotografías y notas y que creasen un archivo donde se conservasen los documentos relativos a los propios monumentos (Carta de Atenas, 1931). Además, la legislación española exige en su LPHE (1985) que los bienes más relevantes del PHE deberán ser inventariados o declarados de interés cultural (artículo 1.3).

En la 11ª Asamblea General del ICOMOS de 1996 son aprobados los Principios para la creación de archivos documentales¹²³ de monumentos, conjuntos arquitectónicos y sitios históricos y artísticos (1996), que tiene como objetivo: “explicar los principales motivos, responsabilidades, principios de organización, contenido y los principios de clasificación y de distribución para registrar la documentación relativa al patrimonio cultural” (Principios para la creación de archivos documentales de monumentos, conjuntos arquitectónicos y sitios históricos y artísticos, 1996). En él puede observarse cómo la Asamblea considera la creación de archivos documentales como un medio fundamental a la hora de determinar y permitir la comprensión, identificación y reconocimiento de los valores del patrimonio cultural, puesto que este se encuentra amenazado incesantemente y la responsabilidad de su conservación y protección incumbe tanto a sus propietarios como a los especialistas en conservación, a los responsables políticos y administrativos y al público en general.

El documento establece el registro documental¹²⁴ como acto esencial y cuestión prioritaria que debe acometerse con un alto grado de precisión y se establecen además, entre otras, las bases referentes a cuál debe ser el contenido de estos archivos. Con el fin de favorecer este proceso de registro, el compromiso nacional debe ser máximo y, para su organización, se recomienda investigar y evaluar todas las fuentes existentes. Esta investigación exige que los métodos de registro para la obtención de la documentación sean apropiados a la naturaleza del patrimonio a tratar, así como al uso que vaya a realizarse de

¹²³ Los archivos documentales de los monumentos, conjuntos arquitectónicos y sitios históricos y artísticos pueden incluir testimonios, tanto materiales como inmateriales, y representan una parte de la documentación que puede contribuir a la comprensión del patrimonio cultural y a los valores de los que éste es portador (Principios para la creación de archivos documentales de monumentos, conjuntos arquitectónicos y sitios históricos y artísticos, 1996).

¹²⁴ Recopilación de las informaciones que describen la configuración física, el estado y el uso que se da a los monumentos, conjuntos arquitectónicos y sitios históricos y artísticos, en un determinado momento (Principios para la creación de archivos documentales de monumentos, conjuntos arquitectónicos y sitios históricos y artísticos, 1996).

dicha documentación (Principios para la creación de archivos documentales de monumentos, conjuntos arquitectónicos y sitios históricos y artísticos, 1996).

Este documento se presenta como fundamental puesto que actualmente los proyectos de Arqueología Virtual requieren el registro y organización de toda la documentación a ellos concerniente siguiendo estos principios (Principio 7.4, Principios de Sevilla, 2011).

De este modo, tal y como ha sido puesto de manifiesto en el cap. 4, las posibilidades que los escáneres 3D y la fotogrametría presentan a la hora de documentar patrimonio, han aumentado cuantiosa y cualitativamente la calidad de la documentación obtenida. Una vez revisados los datos aportados por numerosos proyectos en los que la tecnología 3D ha mejorado la documentación de un bien en concreto, incluso llegando a conseguirse lo que hace años jamás se hubiese imaginado, se considera de urgencia formar a los profesionales del ámbito del patrimonio en los usos de estos sistemas. Una vez el sector laboral pueda hacer un correcto uso de estas técnicas, podrá realmente entenderse la importancia y el alcance que presentan. A su vez, se considera fundamental comenzar a incluir y desarrollar metodologías de su empleo para establecerlas en los protocolos de actuación referentes a la documentación, así como la revisión de las normas y leyes a ella referidas.

Las técnicas 3D, especialmente los escáneres láser y la fotogrametría, han mejorado notablemente la forma de documentar el patrimonio arquitectónico, especialmente para realizar los levantamientos 3D. Con respecto al empleo de las técnicas tradicionales, actualmente estos levantamientos cuentan con varias ventajas, entre las que puede destacarse: la agilización en el proceso de obtención de los datos, los cuales son, a su vez, más exactos y fiables; y el aumento de la comprensión por parte del público y los investigadores que visualizan los resultados.

Así, tal y como indica la Carta del Rilievo, declaración sobre el levantamiento arquitectónico del año 2000, el levantamiento arquitectónico sería un proceso de investigación que requiere la planificación de las acciones a cumplir y debe ser verificable tanto a lo largo del proceso como en los resultados finales, también por medio de la posibilidad de ser recorrido de nuevo con el fin de verificar su autenticidad y la calidad del producto. Los nuevos métodos de levantamiento complementan a los tradicionales y están proporcionando resultados útiles y significativos. En muchas ocasiones es indispensable la utilización integrada de distintos métodos con el fin de documentar de un modo adecuado las cualidades del objeto. La codificación gráfica, a la espera de un sistema unificado

aceptado a nivel internacional, debe atenerse cuanto menos a las normas hasta ahora adoptadas en centros nacionales e internacionales; además, deben ser también fácilmente utilizables dentro de los sistemas informáticos (Carta del Rilievo, 2000). De este modo, es posible destacar que el levantamiento arquitectónico constituye un sistema de documentación del patrimonio no solo aceptado, puesto que existe una carta dedicada expresamente a esta disciplina, sino que es ampliamente recomendado. Como en otras cartas, se hace referencia a la necesidad de crear “un sistema unificado aceptado a nivel internacional” (Carta del Rilievo, 2000) que regularice el modo y la técnica de realizar los levantamientos.

No puede dejar de mencionarse la importancia que tiene la monitorización del estado de conservación de determinados bienes, tal y como se ha indicado en capítulos anteriores. En el documento *Directrices prácticas para la aplicación de la convención del Patrimonio Mundial* de la Unesco se trata, entre otros temas, la necesidad de realizar una lista de patrimonio mundial amenazado que sea debidamente inscrito y registrado. A partir de esa lista, debe realizarse el monitoreo de ese patrimonio y presentar al Comité los informes sobre el estado de conservación de estos bienes inscritos o bien que deban inscribirse. En el documento queda especificado también la información que la documentación entregada debe recoger, el tiempo de entrega y todos los detalles necesarios para realizar debidamente el monitoreo del bien (Párrafo 169 al 180, *Directrices prácticas para la aplicación de la convención del Patrimonio Mundial*, 2008).

Sin embargo, la propia heterogeneidad del concepto patrimonio diversifica amplísimamente los métodos y técnicas destinados a su documentación, dada a la gran cantidad de variables que intervienen en su configuración. Por ello, deberían construirse un conjunto de recomendaciones que en base a una experiencia adquirida determinasen, para cada caso, un conjunto de normas o procedimientos definidos en unos estándares básicos. Se garantizaría entonces la aplicación de un procedimiento científico y su propia verificación. Tal y como se ha podido comprobar en esta revisión, existen aún carencias de estándares, lo que ha derivado en un menor aprovechamiento de todos los recursos que esta documentación ofrece (Angás, 2011, p.155).

8. 2. 3 Restauración virtual de la obra de arte

Los criterios y metodologías en la conservación de los bienes culturales han ido evolucionando, como también se ha ido transformando a lo largo de la historia la legislación relativa a este ámbito.

Fundamental es mencionar, dada la antigüedad y novedad que supuso en la época, la creación del cargo público de restaurador *curator statuarum* en época del emperador romano Constantino. Por su parte los primeros textos jurídicos en los que se trata acerca de intervenciones sobre patrimonio se remontan al s. III, y constituyen los textos de Sexto Pomponio y Julio Paulo, referentes a actuaciones en esculturas. En ellos se discute sobre cómo actuar en la eliminación de partes que se han de quitar a una escultura para recomponer otra: los brazos y piernas pueden ser retirados para ser colocados en otras esculturas, pero se consideraba que la cabeza era esencial para caracterizar una imagen, por lo que no debía quitarse del original (Macarrón, 2013, pp.43 y 44).

Sin embargo, ha sido recientemente, en época contemporánea, cuando la restauración ha adquirido una mayor conciencia en sus propios fines y medios, fundamentándose sobre bases técnico-científicas y en una metodología crítico-estética (Martínez, Sánchez-Mesa, D. y Sánchez-Mesa, L., 2008, p.29).

Una de las más conocidas aportaciones a las teorías de la restauración actual es la *Teoría del Restauro* de Cesare Brandi, cofundador y director del Instituto Centrale di Restauro de Roma. Brandi defendió la necesidad y posibilidad de unificar criterios de actuación ante una obra de arte. En su teoría se apoya la idea de que la restauración no puede pretender reversibilizar los efectos del tiempo sobre la obra, puesto que su historia se vería entonces abolida. La obra de arte además tiene un significado y valor estético que radica en su composición y proceso de elaboración y estos aspectos están presentes a través de la materia que constituye el objeto, siendo esta sobre la que actúa la restauración (Macarrón, 2013, pp.281 y 282).

Todo ello ha logrado una sociedad más involucrada en la sensibilidad y puesta en valor de la profesión del restaurador, aunque no cabe duda de que es aún necesario avanzar más en este sentido. Aunque ya son numerosos los avances conseguidos en cuanto a leyes y

decretos, actualmente no existe una clara legislación que se refiera, por ejemplo, a las restauraciones virtuales, por lo que son estas cartas las que continúan a día de hoy guiando a los diferentes profesionales del patrimonio. Por ello, existen numerosos vacíos a la hora de extrapolar sus directrices al ámbito de las nuevas tecnologías 3D aplicadas al patrimonio, puesto que fueron redactadas en un momento en que la tecnología 3D no era ni tan siquiera imaginada. Sin embargo, en la primera Carta del Restauo se observa que:

A pesar de la diversidad de casos especiales en los que se pueden adoptar soluciones específicas, predomina en los diferentes Estados presentados, la tendencia general a abandonar las restituciones integrales y a evitar sus riesgos mediante la institución de obras de mantenimiento regular y permanente, aptos para asegurar la conservación de los edificios. (Carta de Atenas, 1931)

Este principio, tal y como conocen todos los profesionales del patrimonio, se mantiene actualmente en vigor y constituye una de las primeras premisas que el restaurador aprende en su formación profesional.

Vigentes continúan también los puntos de la Carta que instan a: respetar la obra histórica y artística en los casos en los que la restauración sea indispensable y a, cuando se trabaja con ruinas, imponer una escrupulosa labor de conservación, recomendando la anastilosis cuando las condiciones así lo permitan y, por supuesto, ante la necesidad de emplear materiales nuevos, que estos sean siempre reconocibles. Por su parte, cuando la conservación de ruinas se valore como tarea imposible, deberán enterrarse nuevamente, tras realizar los levantamientos precisos (Carta del Restauo, 1931).

Por su parte, en la siguiente Carta, la italiana de 1932, el Consejo era consciente de la necesidad de mantener y perfeccionar cada vez más la actividad de la restauración y afirma que el "*repristino*" puede realizarse sólo cuando se base en datos absolutamente ciertos proporcionados por el monumento que hay que repristinar y no en hipótesis; en elementos de gran relevancia existentes antes que en elementos preferentemente nuevos. También se indica que en los monumentos antiguos debe excluirse ordinariamente todo completamiento, considerando sólo la anastilosis y la adición eventual de aquellos elementos neutros que representen el mínimo necesario para integrar la forma y asegurar las condiciones de conservación. También indica que los añadidos que se consideren necesarios deben ser

cuidadosa y claramente señalados, de modo que nunca puedan conducir a engaño y representar una falsificación de un documento histórico (Carta Italiana, 1932).

La Carta de Venecia de 1964 declara en su primer párrafo la importancia que para los pueblos presentan sus obras monumentales, portadoras de un mensaje espiritual del pasado y testimonio vivo de sus tradiciones seculares, considerándolas patrimonio común y reconociéndose responsable de su salvaguardia frente a las generaciones futuras en su completa autenticidad (Carta de Venecia, 1964). Esta autenticidad conlleva intervenciones de restauración que no alteren la historia ni, por tanto, los significados de estos monumentos, puesto que de lo contrario en un futuro su lectura no será la correcta y vendrá determinada por las malas intervenciones realizadas en el pasado. Por ello, la restauración virtual presenta tantas ventajas al permitir, en numerosas ocasiones, limitar las intervenciones físicas al mínimo, reservándose los grandes cambios para estas restauraciones virtuales.

Ante una intervención de conservación y restauración, como bien es sabido, son numerosas las recomendaciones sobre cómo debe ser abordada. Según la Carta de Venecia (1964): “La conservación y restauración de los monumentos constituyen una disciplina que se sirve de todas las ciencias y técnicas que puedan contribuir al estudio y a la salvaguardia del patrimonio monumental” (art. 2).

Con este artículo queda muy claro que actualmente las tecnologías 3D deberían emplearse, siempre que vayan a aportar datos y mejorar las técnicas tradicionales, en las intervenciones del patrimonio monumental. Parece algo regido por el sentido común, pero es cierto que, tal y como se ha indicado, no solo no siempre es así, sino que existen sectores que se muestran reticentes a incluir estos avances en los protocolos de intervención.

Siempre que se restaura una obra de arte existe el riesgo de modificarla, atentando de este modo contra su integridad, interés legítimo o reputación profesional del autor (Espín, 1996, pp.91 y 92), por lo que, en la mayor medida posible, las técnicas científicas y, sobre todo, las tecnologías 3D, deben complementar a las técnicas tradicionales puesto que numerosos son los ejemplos anteriormente citados en los que las mejoras que su empleo conlleva han quedado más que demostradas.

Del mismo modo, el carácter excepcional de la restauración junto con su finalidad de conservar conlleva a que la intervención se detenga allí donde comienzan las hipótesis y estará siempre precedida y acompañada de un estudio (art. 9 y 10, Carta de Venecia, 1964)

lo que hace que las hipótesis realizadas virtualmente contribuyan notablemente a descartar opciones y a estimar diferentes posibilidades, mejorando los resultados de los estudios.

Además, cuando las técnicas tradicionales se manifiesten inadecuadas, la consolidación de un monumento puede ser asegurada mediante el auxilio de todos los medios más modernos de construcción y de conservación, cuya eficacia haya sido demostrada por datos científicos y garantizada por la experiencia (art. 10, Carta de Venecia, 1964). Es de suponer que este texto de 1964 poco esperaba del avance tecnológico que estaba a punto de ocurrir, sin embargo, cuando dice “mediante el auxilio de todos los medios más modernos de construcción y de conservación” y se extrapola a la actualidad, no puede dejar de afirmarse que actualmente los medios más modernos de conservación pasan por el empleo de estas tecnologías, que a su vez amplían la información de los estudios llevados a cabo a la hora de intervenir un monumento, como bien puede ser esa acción tan importante como es la consolidación.

Entre las recomendaciones queda también muy claro que deberán *a priori* excluirse aquellos trabajos de reconstrucción, siendo aceptable tan sólo la anastilosis (art. 15, Carta de Venecia, 1964). Si se relaciona lo expuesto con las tecnologías 3D puede decirse que, si virtualmente se reconstruye el monumento, el original queda intacto, sin intervenir de modo físico alguno, a la espera de que nuevas investigaciones o incluso, técnicas, mejoren la situación del mismo. Por su parte, la aceptada técnica de la anastilosis ha mejorado considerablemente cuando las piezas se digitalizan y se manejan virtualmente, reduciéndose los tiempos de trabajo, los riesgos ante la manipulación del original, y los costes de las intervenciones. En el proceso, las piezas digitalizadas son catalogadas y organizadas física y virtualmente facilitándose así los trabajos de anastilosis. Sin embargo, cuando se trata de un gran conjunto de piezas de pequeño tamaño, es muy complicado manejarlas con rapidez, aunque se encuentren debidamente nombradas y organizadas, por lo que es ante estos casos concretos cuando destaca más notablemente la reducción del tiempo de trabajo invertido, puesto que virtualmente se busca fácilmente el modelo de la pieza que se requiere a partir de su nombre, y rápidamente aparece en el programa o base de datos empleado. Por otro lado, si se trata de piezas de gran tamaño, en ocasiones inamovibles sin maquinaria, ocurre lo mismo, puesto que virtualmente el profesional las maneja rápidamente. El ir uniendo las piezas digitalizadas, empleando incluso programas que ayudan en estas uniones con la lectura de las roturas de las piezas, encontrando las similitudes entre unas y otras, ayuda a

encontrar las parejas y grupos de piezas que deben unirse. Por lo que respecta a la reducción en el tiempo de la manipulación, es obvio que, si se ha estado probando con las piezas para que encajen, el contacto directo con las obras, por muchos cuidados conlleve esa manipulación, siempre acarrea riesgos. Al digitalizar las piezas, esta manipulación puede limitarse a la fase final consistente en experimentar si las piezas encajan tal y como se ha estimado virtualmente, para unir las en la anastilosis física. Por último, el abaratamiento de los costes se produce en el momento en que un trabajo de anastilosis complicado deja de requerir un gran número de profesionales que estén años estudiando las piezas y restos *in situ*, lo que suma los costes de: desplazamientos del personal, alojamientos, gastos de vida y el tiempo de trabajo, entre otros. Con la digitalización de las piezas, el equipo puede trabajar cómodamente con los modelos 3D estando cada uno en el lugar donde residen y trabajan habitualmente, pudiendo, de hecho, realizar otros trabajos a la par, agilizándose así las investigaciones. En un proyecto, por ejemplo, uno o dos miembros pueden ser los encargados de desplazarse y trabajar unos días en la toma de los datos mientras que el resto de los miembros realiza otro tipo de estudios referentes o no a dicho proyecto. Tal es el caso, ya citado en detalle en el capítulo 6, de Factum Arte, empresa que desplazó a unos cuantos trabajadores a Egipto para la realización del facsímil de la *Tumba de Tutankamón* con el fin de digitalizarla, mientras el resto trabajaba desde Madrid. De este modo, los costes se vieron abaratados. A pesar de la opinión generalizada de que las nuevas tecnologías son caras, ya ha sido demostrado que, empleando una buena cámara fotográfica y softwares de fotogrametría, los resultados que se obtienen son de altísima calidad, sin ser precisa la compra ni alquiler de sofisticados equipos.

De este modo, combinando las cartas con los numerosos debates y revisiones realizados por profesionales del patrimonio, a finales del s. XX se alcanzó un mínimo consenso en criterios de intervención de restauración. En líneas generales se puede decir que los objetivos esenciales son devolver a la obra la legibilidad desde un punto de vista estético, salvaguardando, eso sí, todos sus valores documentales genuinos y los añadidos que sea necesario mantener, exceptuando aquellos casos en que estos constituyan un peligro para la estabilidad y conservación de la obra. Las intervenciones por tanto están sujetas a unos principios éticos fundamentales para asegurar, entre otros, anteponer la conservación a la restauración y el respeto de todos los valores documentales de la obra (Macarrón, 2013, p.283).

Por último, debe revisarse el documento Los Principios de Sevilla, Principios internacionales de la arqueología virtual, de 2011, en el que son, ya sí, definidos los nuevos conceptos de anastilosis virtual, arqueología virtual, restauración virtual y reconstrucción virtual, previamente desarrollados en anteriores capítulos (Los Principios de Sevilla, 2011). La aparición de estas definiciones es clave puesto que queda así demostrada la necesidad de crear definiciones ante las nuevas posibilidades que la tecnología 3D presenta. Sin definiciones y conceptos asentados, es complicado recomendar y unificar criterios de intervención que aseguren la buena *praxis* en las intervenciones y estudios del patrimonio.

A partir de ahí, asumiendo estas nuevas técnicas de restauración, el documento afirma que cuando se realicen restauraciones o reconstrucciones virtuales se debe mostrar de forma explícita los niveles de veracidad en los que estas se sustentan. Además, puesto que son numerosos los restos arqueológicos que han sido y siguen siendo restaurados o reconstruidos materialmente, la visualización debe permitir al público en general y a los investigadores diferenciar entre: los restos que se han conservado *in situ*, los que han sido intervenidos mediante anastilosis real, las zonas que han sido reconstruidas parcial o totalmente sobre los restos originales y las que han sido restauradas o reconstruidas virtualmente. De este modo debe ser siempre posible “saber que es real, veraz, auténtico y que no”, siendo fundamental que la autenticidad sea un concepto siempre operativo en cualquier proyecto de arqueología virtual (Principios 4.2, 4.3 y 4, Los Principios de Sevilla, 2011). Por ello, ante una intervención sobre el patrimonio empleando las nuevas técnicas virtuales, los profesionales deberían siempre seguir los principios aquí referidos, aunque se considera que estos deben continuar siendo revisados y ampliados con el fin de mejorar cada vez más estas actuaciones.



Fig. 308 Los principios de Sevilla, centrados en la Arqueología Virtual. ©Seav.

Es evidente que con estas técnicas no se pretende que la restauración elimine sus prácticas de actuación, sino que sirva como apoyo tecnológico, con el fin de realizar una adecuada interpretación de las necesidades particulares del bien en cuestión (Rodríguez, 2015, p.5).

Gracias a la restauración virtual surge la posibilidad de intervenir lo menos posible el objeto y se hace viable la propuesta del historiador de arte Alois Riegl (1859-1905): reparar las pérdidas o vacíos producidos en las obras empleando copias sin tocar el original, a fin de no falsearlo para la investigación histórica del futuro (Macarrón, 2013, p.285).

Por supuesto, ha de recordarse una vez más que toda restauración digital debe basarse en hipótesis firmes, en las que, independientemente de su objetivo, el proyecto debe siempre estar respaldado por un exhaustivo trabajo de investigación interdisciplinar. Con la metodología deben seguirse las mismas pautas de la restauración material, es decir, asentarse en evidencias documentales, históricas y arqueológicas (Escriva y Madrid, 2010, p.14). Tal y como ocurre con todas las actuaciones implicadas a la hora de estudiar obras de arte, el tratamiento digital de imágenes aplicado a investigación y restauración exige una gran responsabilidad. Es imprescindible partir de las formulaciones teóricas correctas ya que el procedimiento es empírico y la obtención de buenos resultados depende directamente de los conocimientos de los investigadores (Macarrón y González, 2011, pp.135 y 136).

De este modo, el mundo virtual no debe, ni puede, dar carta blanca a la imaginación del conservador-restaurador. Se debe trabajar bajo los mismos límites de legitimidad y autenticidad conocidos (ver capítulo 9), aunque se permita la licencia de recrear virtualmente la teoría-hipótesis. Más que nunca, sigue siendo esencial un estudio exhaustivo de la obra, que incluya el estudio interdisciplinar (histórico, arqueológico, antropológico, artístico, químico...), a fin de que la hipótesis sea sólida (Escriva y Madrid, 2010, p.14).

8. 2. 4 Falsificaciones, copias y facsímiles o reproducciones

La realización en determinadas ocasiones de una reproducción, recordando el capítulo 6, ha supuesto numerosos avances a la hora de tomar medidas de conservación preventiva. Desde la Carta de Atenas de 1931 se recomendaba, a modo de precaución, la conservación de los modelos originales cuando todavía existen y la ejecución de copias cuando estén faltando (Carta de Atenas, 1931). Sin embargo, sin seguir las leyes e indicaciones existentes, la reproducción o facsímil puede convertirse en una falsificación si la información que trasmite no se identifica con los diversos aspectos que engloba la obra de arte original. Dicha falsedad

puede ser técnica o ética. La falsedad técnica hace referencia a una infidelidad de registro, por lo que se obtiene como resultado una pieza que no representa fielmente las propiedades del original. En ocasiones todas las propiedades son imposibles de reproducir, resultando imprescindible obviar el problema, por ejemplo, del peso de las piezas, que realmente no representa una propiedad necesaria de reproducir. Sin embargo, la falsedad ética supone una intención de engañar al indicar que la pieza es fiel, aunque no lo sea o incluso, en caso más grave, intentar suplantar el original. Igualmente, en muchos casos puede darse que al observador no se le informe de que está observando una reproducción y no el original (Pereira, 1999, p.68).

Es por ello que la realización de copias y facsímiles es una de las implicaciones más polémicas que la tecnología 3D tiene para el patrimonio. Las falsificaciones y el mercado negro de obras de arte están más generalizados de lo que el público podría esperar, puesto que determinados expertos estiman que las obras falsas suponen entre un 10 y un 40% del volumen total del mercado del sector artístico. De hecho, tanto Thomas Hoving, historiador del arte y ex director del Museo Metropolitano de Nueva York en su obra *False Impressions: The Hunt for Big-Time Art Fakes* como la Brigada de Patrimonio Histórico de la Policía Nacional, unidad que investiga este tipo de estafas en España, coinciden y se decantan por una cifra más elevada. La falsificación de obras de arte es uno de los fraudes más antiguos de la historia. Existen numerosos ejemplos de ello y supone una enorme traba para el mercado internacional del arte. Los marchantes y expertos de las casas de subastas se enfrentan con frecuencia a fieles falsificaciones de Picasso, Pollock, Chagall, Braque o Mondrian (Paterna, 2015).

Ejemplo de ello es el caso descubierto en 2010 de María Apelo Cruz, que se convirtió en una falsificadora involuntaria cuando Tatiana Khan, propietaria de la galería Chateau Allegre le dijo que el cuadro *La femme au chapeau bleu* de Picasso había sido robado. Cruz había trabajado con Khan en el pasado y, ante la petición de esta de realizar una copia del cuadro a partir de una fotografía con el fin de encontrar al ladrón, no puso en duda la historia y realizó la copia. Khan le pagó 1.000 dólares y después vendió el cuadro por 2.000.000 dólares (Fahrenheit Magazine, 2014). Cuando el FBI se puso en contacto con Khan en 2009, según la denuncia, la galerista le dijo a Cruz que no divulgara que había creado el falso Picasso y que cambiara la factura para simular que Cruz simplemente había retocado una pintura original. Como parte de su acuerdo de declaración de culpabilidad, Khan debía restituir al comprador del falso Picasso el importe íntegro pagado y perdería una obra del pintor impresionista abstracto Willem de Kooning que Khan había comprado con parte de las ganancias de su fraude (Blankstein, 2010).



Fig. 309 *La Femme Au Chapeau Bleu*.
©U.S. Department of Justice.

Tan conocidos son algunos de los falsificadores que en el círculo de Bellas Artes de Madrid se acogió en el 2013 la exposición temporal *Elmyr de Hory. Proyecto fake*. Elmyr de Hory fue uno de los falsificadores de obras de arte más importante de la historia. Se dice que llegó a pintar más de mil cuadros y él mismo se alardeaba de que eran expuestos en museos de todo el mundo, bajo la firma, entre otros, de Picasso, Modigliani o Degas (Círculo de Bellas Artes, 2013).

Este caso es solo una muestra de cómo los criterios, entre los que destacan: el grado de reconocimiento de su autor, la calidad, el estado de conservación, antigüedad, rareza o incluso el tema; en ocasiones son asombrosos y contradictorios puesto que el hecho de que una obra de arte sea falsa no impide que esta se venda en el mercado legalmente. Existe así un mercado para las falsificaciones o las copias de conocidos falsificadores que lógicamente no tienen el mismo valor que la obra del artista inicial, pero sí que se les da gran valor por la parte académica y su ejecución. De hecho, existe incluso un museo de las falsificaciones en Viena (Paterna, 2015).

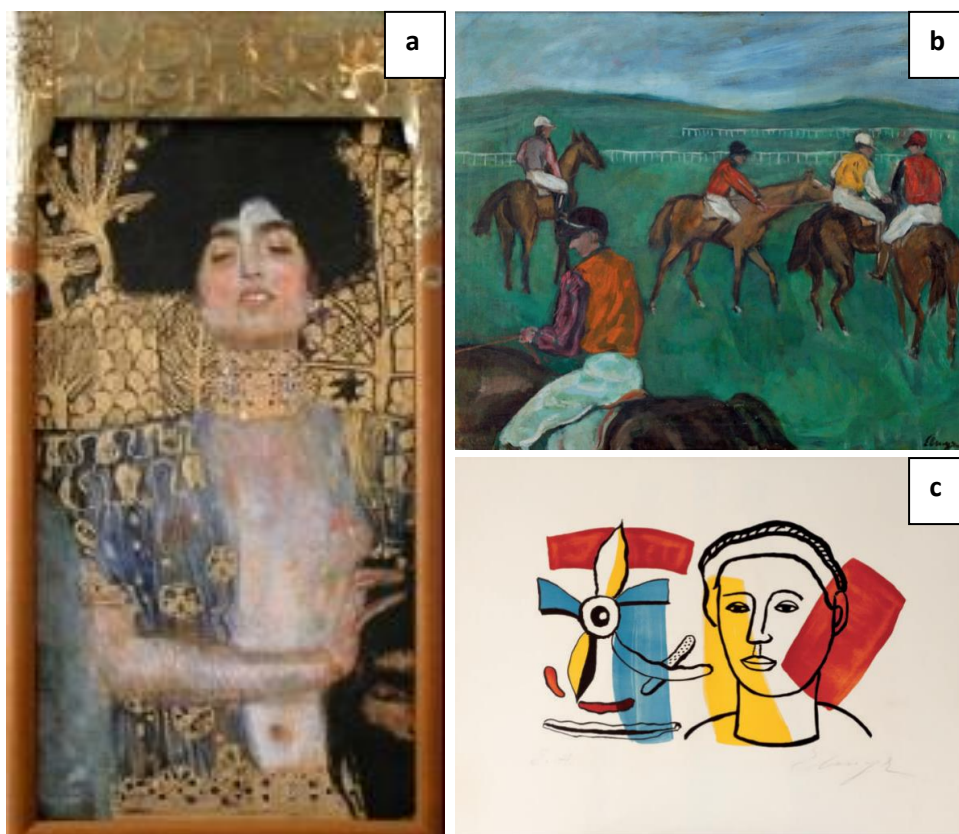


Fig. 310 Ejemplos de obras copiadas expuestas en museos: a) Copia de la obra *Judith* de G. Klimt. ©Fälschermuseum Wien; b) *A la manera de Degas*. Óleo sobre lienzo, firmado Elmyr. ©Colección MACE, Ajuntament d'Eivissa; c) *A la manera de Léger (Hommage à Fernand Léger)*. Litografía, firmado Elmyr. ©Colección Branger.

Sin embargo, tal y como fue revisado en el capítulo 6, la exigencia de autenticidad corresponde a los dos últimos siglos (Rtve, 2013), puesto que, hasta la Ilustración, el ideal de autenticidad y original no se presentaba como una característica relevante para la obra (Berjano y Fernández, 2003, p.85). La autenticidad en el s. XX aparece, sin embargo, como un factor esencial en los estudios científicos del patrimonio cultural, en la planificación de la conservación y la restauración, en los procedimientos de registro de la convención de patrimonio mundial y otros inventarios de patrimonio cultural. Sin embargo, se tiene en cuenta el hecho de que los juicios sobre los valores atribuidos a las propiedades culturales y la credibilidad de las fuentes de información relacionadas puede diferir de cultura en cultura e incluso dentro de la misma cultura. Esto conlleva la imposibilidad de realizar juicios de valor o autenticidad con un criterio fijo, por lo que corresponde a cada cultura el reconocimiento concordante con la naturaleza específica de los valores de su patrimonio y con la credibilidad y veracidad de las fuentes de información relacionadas. Por tanto, dependiendo de la naturaleza del patrimonio cultural, su contexto cultural, y su evolución a

lo largo del tiempo, los juicios de autenticidad pueden relacionarse con una gran variedad de fuentes de información (Documento de Nara, 1994).

Con respecto a la originalidad necesaria para que la obra sea protegida por el derecho de autor, debe hacerse distinción entre la originalidad absoluta y la relativa, que se da cuando el autor parte de una obra ya existente que de algún modo transforma en otra diferente por la introducción de algún elemento novedoso original (Espín, 1996, p.71). Tal y como la LPI, (1987) indica:

Son también, sin perjuicio de los derechos de autor sobre la obra original, objeto de propiedad intelectual: las traducciones y adaptaciones; las revisiones, actualizaciones y anotaciones; los compendios, resúmenes y extractos; los arreglos musicales y cualesquiera transformaciones de una obra literaria, artística o científica (art.11).

En este sentido, se está haciendo referencia a las copias de obras de arte realizadas a mano, en las que la subjetividad puede jugar un papel más o menos presente en el resultado. Sin embargo, ante la realización de una reproducción o facsímile, en la cual no existen elementos novedosos, la ley no incluye artículos ni normativa alguna sobre su tratamiento jurídico, por lo que el vacío legal que actualmente existe, debería ser de nuevo tratado en futuras modificaciones de la LPI.

8.2.5 Divulgación, didáctica e investigación

Tal y como indica la LPI (1987):

Se entiende por divulgación de una obra toda expresión de la misma que, con el consentimiento del autor, la haga accesible por primera vez al público en cualquier forma y, por publicación, la divulgación que se realice mediante la puesta a disposición del público de un número de ejemplares de la obra que satisfaga razonablemente sus necesidades estimadas de acuerdo con la naturaleza y finalidad de la misma. (art. 4)

En el ámbito de la conservación del patrimonio cultural también es, asimismo deseable, la publicación de los planteamientos de conservación aplicados a las obras. A pesar de que, como ya se ha indicado, el derecho moral del autor le capacita a decidir si conserva su obra en su propia esfera personal o si la da a conocer, en lo referente al ámbito patrimonial, tanto en las primeras Cartas del Restauo como en las ultimas, constantemente se recomienda la difusión de los resultados obtenidos en las investigaciones mediante noticias y publicaciones regulares en las que se dediquen algunos artículos a los procedimientos y a los métodos de conservación de los monumentos históricos (Carta de Atenas, 1931) y la publicación de la documentación obtenida durante los trabajos de conservación, de restauración y de excavación (art. 16 Carta de Venecia, 1964). En la Carta italiana de 1932 se expresa el deseo de que:

Cada año se celebre en Roma una reunión amistosa (cuyas actas podrían ser publicadas en el *Bolletino d'Arte* del Ministerio de Educación Nacional) en la cual cada superintendente exponga los casos y los problemas que se les presenten para reclamar la atención de los colegas, para exponer las propuestas de soluciones. (Carta Italiana, 1932)

A su vez, se pide “que sea obligatoria la compilación y conservación metódica de los diarios de restauración y que a ser posible se procure la publicación científica de los datos y noticias analíticas que se extraigan de aquéllos” (Carta Italiana, 1932).

Ya en documentos más recientes se insta a divulgar también toda la documentación tomada en el transcurso de la visualización computarizada, de tal manera que los resultados de la visualización puedan ser plenamente comprendidos (Principios 4.6, Carta de Londres, 2006).

Esta documentación debe, por tanto, darse a conocer empleando los medios disponibles más apropiados (gráficos, textos, videos, audio, números o la combinación de todos ellos) y es necesaria la realización de una divulgación de forma sostenible en relación a las ontologías y criterios apropiados (Principios 4.11 y 4.12, Carta de Londres, 2006). Las leyes también contemplan la conservación, salvo que sea estipulado lo contrario, del derecho de explotación de aquellos autores cuyas obras sean reproducidas en publicaciones

periódicas y en caso de que la obra no se reprodujese en el plazo de un mes desde su envío o aceptación en las publicaciones diarias o en el de seis meses en las restantes, el autor puede disponer libremente de ella (art.52, LPI, 1987).

Las publicaciones en forma de artículos y libros han sido el medio más común de divulgar las investigaciones y estudios referentes a patrimonio. Tal y como ha podido comprobarse en los numerosos proyectos citados a lo largo de la tesis es posible destacar que las publicaciones sobre proyectos de patrimonio, así como las revistas, documentales, páginas webs y libros donde se publican y dan a conocer, han aumentado notablemente en los últimos años, demostrándose que las recomendaciones de las Cartas están siendo seguidas por parte de los profesionales, que buscan la difusión mediante esos medios.

Por otra parte, en los últimos 15 años los avances tecnológicos y el gran crecimiento del turismo cultural han propiciado el aumento de los proyectos encaminados a investigar, preservar y poner en valor distintos elementos patrimoniales empleando la visualización computarizada (López-Menchero, 2011, p.65).

Actualmente, los métodos de visualización computarizada se emplean en un grandísimo número de contextos de investigación, divulgación y preservación del patrimonio cultural (Carta de Londres, 2006), por lo que puede decirse que se sigue la recomendación de “tomar todas las iniciativas que puedan facilitar la comprensión del monumento descubierto, sin desnaturalizar nunca su significado” (art. 15, Carta de Venecia, 1964). De este modo las tecnologías 3D, una vez más, se presentan imprescindibles para mejorar esta comprensión puesto que como ha sido ya demostrado, con la digitalización de las excavaciones y los modelos 3D generados a partir de ellas los resultados son mejor comprendidos no solo por parte del público general, sino también por parte de los profesionales e investigadores.

La creación de estándares para la difusión de estas visualizaciones comienza a debatirse en los primeros años de la década del 2000. En junio de 2000 el *eEurope 2002 Action Plan* fue aprobado por los Estados miembros de la UE. En abril de 2001, representantes y expertos de los estados miembros se reúnen en Lund para discutir el tema y recomendar medidas que promoviesen una mejor coordinación y añadiesen valor a las actividades de digitalización. Surge así el documento Los principios de Lund donde se recogen las conclusiones de la reunión, con el “objetivo de estimular los contenidos europeos en las redes mundiales para, de esta manera, poder aprovechar plenamente las oportunidades

creadas por el advenimiento de las tecnologías digitales” (Los Principios de Lund, 2001) y crear “un mecanismo de coordinación para programas de digitalización en los Estados miembros” puesto que “el patrimonio cultural y científico de Europa representa un activo singular y valiosísimo. La digitalización de sus recursos es una actividad esencial para hacerlos más accesibles a los ciudadanos y preservar el patrimonio cultural colectivo de Europa”. Así, la digitalización de los recursos se utiliza también “para mantener y fomentar la diversidad cultural en un contexto mundial” puesto que “los bienes culturales constituyen un recurso clave para la educación y para las industrias del turismo y los medios de comunicación”. El documento enfatiza también en la importancia de divulgar y hacer accesibles los contenidos culturales y científicos europeos mediante la creación de inventarios nacionales que se alinearían con la infraestructura europea de contenidos digitalizados. Otros puntos que se demandan son: la inversión y compromiso institucional, crear un foro permanente de coordinación, respaldar y desarrollar una perspectiva europea en materia de políticas y programas, fomentar y respaldar las buenas prácticas y su armonización y optimización dentro de los Estados miembros y en toda la UE y acelerar la asimilación de las buenas prácticas y de las competencias apropiadas (Los Principios de Lund, 2001).

Al mismo tiempo, numerosos investigadores comienzan a enfatizar sobre la importancia de crear debates internacionales abiertos sobre epistemología, ontología y preguntas teóricas referentes al uso de la realidad virtual en el campo del patrimonio cultural, creándose diversas organizaciones y asociaciones, recordando la CAA y la SEAV, entre muchas otras. En 2006, 50 investigadores debatieron acerca de la transparencia científica en la Academia Británica y como resultado, un pequeño grupo de investigadores dirigido por Franco Niccoluccio preparó el documento que constituiría el anteproyecto de la Carta de Londres (Grande y López-Menchero, 2011).

La carta de Londres se organiza en un conjunto de principios, válidos para aquellos casos en que la visualización computarizada se aplica a la investigación o divulgación del patrimonio cultural (Principio 1, Carta de Londres, 2006). El documento tiene como objetivo asegurar que la visualización del patrimonio cultural se lleve a cabo como un trabajo intelectual técnicamente riguroso y que reflejen las propiedades características tanto de las tecnologías de visualización computarizada como de sus métodos de trabajo.

La Carta busca mejorar el rigor con el que los métodos de visualización computarizada y sus resultados se emplean en el ámbito del patrimonio cultural, posibilitando una mejora en la comprensión y el mayor reconocimiento de tales métodos y resultados (Carta de Londres, 2006). Para ello, insta a asegurar la integridad intelectual de los métodos y resultados identificando y evaluando de modo estructurado y documentado las fuentes más relevantes usadas en el proceso de investigación, de modo además, que se posibilite que los métodos y resultados puedan ser entendidos y evaluados proporcionando la suficiente información (Principios 3 y 4, Carta de Londres, 2006). Esta carta supuso un avance muy importante en esta dirección; sin embargo, todavía es posible y necesario seguir profundizando en sus principios y aumentar sus condiciones de aplicabilidad, puesto que todas las posibilidades de divulgación que esta nueva tecnología aporta al mundo del patrimonio podrían verse truncadas si no se presta la debida atención a la parte más teórica de la disciplina (López-Menchero, 2011, p.65). De hecho, las diversas actualizaciones realizadas sobre la Carta de Londres desde su creación revelan la necesidad de encontrar un documento cuyas recomendaciones sirvan como base a la hora de diseñar nuevos proyectos cada vez con mayor rigor y constituyan guías adaptadas a las necesidades específicas de cada rama y comunidad de expertos. De hecho, uno de sus objetivos busca ofrecer fundamentos sólidos para la comunidad de especialistas con el fin de que puedan elaborar criterios y directrices mucho más detalladas (López-Menchero, 2011, p.65).

Es fundamental comprender que la creación y divulgación de las visualizaciones computarizadas deben planearse siempre de modo que contribuyan a mejorar el estudio, comprensión, interpretación, conservación y gestión del patrimonio cultural (Principio 6, Carta de Londres, 2009). El documento indica que únicamente deben ser empleada en aquellos casos en los que resulta el método disponible más apropiado para lograr los objetivos propuestos (Principio 2, Carta de Londres, 2009).

Por su parte, los Principios de Sevilla es un documento que surge como continuación de la Carta de Londres y se refiere también a la visualización computarizada. Los Principios, a los que se ha hecho referencia en diversas ocasiones en la presente tesis doctoral, reúnen los principios internacionales de visualización de la arqueología virtual con la pretensión de aumentar sus condiciones de aplicabilidad en el campo del patrimonio arqueológico, simplificando y ordenando sus bases y ofreciendo nuevas recomendaciones que toman en consideración la naturaleza de este tipo de patrimonio (López-Menchero y Grande, 2011,

p.34). Así, en el documento se añade que antes de comenzar la elaboración de cualquier visualización asistida por ordenador se debe dejar totalmente clara la finalidad y el objetivo que se persigue alcanzar con el trabajo. Además, se indica que su aplicación no debe ser entendida como sustitutiva, sino como complementaria de otros instrumentos. Y se pone de manifiesto además que, para lograr los niveles de rigurosidad y veracidad histórica óptimos, la visualización del pasado debe sustentarse en una investigación y documentación histórica y arqueológica (Principios 2, 3 y 5, Principios de Sevilla, 2011). El documento también incluye los principios de: eficiencia, según el cual la clave se encuentra en emplear menos recursos para lograr cada vez mejores resultados; transparencia científica, por el cual toda visualización debe de ser esencialmente transparente de modo que sea posible de contrastar por otros investigadores o profesionales; y el de formación y evaluación según el cual la arqueología virtual, como disciplina científica que posee un lenguaje y unas técnicas propias, requiere de programas específicos de formación y evaluación (Principios 6, 7 y 8, Principios de Sevilla, 2011).

Por lo que a didáctica respecta, según el artículo 32 apartado 2 de la LPI el profesorado de la educación reglada no necesitará autorización del autor para realizar actos de reproducción, distribución y comunicación pública de pequeños fragmentos de obras o de obras aisladas de carácter plástico o fotográfico figurativo cuando tales actos sirvan para ilustrar sus actividades educativas en las aulas, siempre que se trate de obras ya divulgadas y salvo imposibles, se incluyan el nombre del autor y la fuente. Quedan excluidos los libros de texto y los manuales universitarios (De la Torre-Cantero et al., 2015, pp.432 y 433).

Capítulo 9. Estudio de casos. Resultados obtenidos

A lo largo de la presente tesis doctoral, numerosos han sido los proyectos y estudio de casos citados en los cuales han sido utilizadas las diferentes tecnologías 3D al servicio del patrimonio. Estos ejemplos han ilustrado cada capítulo con el fin de instruir al lector en la comprensión del impacto que estas técnicas representan en la documentación, conservación y restauración de los bienes culturales.

En este capítulo, la autora de la tesis desarrolla el estudio de diversos casos que ha puesto en práctica con el fin de poder valorar personalmente si el empleo de las tecnologías 3D presenta realmente tantas ventajas en la conservación de bienes culturales y en su difusión. También se tiene como objetivo conocer los posibles inconvenientes que presentan estas tecnologías. La realización de esta fase de la investigación se muestra como imprescindible, puesto que solo mediante comprobación empírica, mediante la experimentación y la observación, es posible extraer conclusiones certeras.

Dos han sido los escenarios en los que se han realizado los estudios: por un lado, el Laboratorio de Morfología¹²⁵ Virtual del Consejo Superior de Investigaciones Científicas y por otro, la Universidad Complutense de Madrid. Así, se muestran diversos ejemplos que incluyen la conservación y difusión de bienes paleontológicos del CSIC, así como la conservación del patrimonio complutense, entre el que se encuentra la escultura pública *Los Portadores de la Antorcha* y la Farmacia Hispanoárabe del Museo de la Farmacia Hispana.

¹²⁵ La morfología se ocupa del estudio de la forma de los organismos y las relaciones entre sus partes. El campo investiga cualitativa y cuantitativamente la variación normal y patológica de los organismos, su crecimiento y desarrollo durante la ontogenia, y es una piedra angular para los estudios del registro fósil (Weber G. W, 2015, p.22).

En este capítulo de la tesis podrá comprobarse que han sido desarrolladas metodologías de trabajo para cada una de estas obras extrapolables a otras con características físicas y problemáticas de conservación similares.

Los estudios de casos han sido desarrollados a lo largo de los casi 4 años que la realización de esta tesis ha supuesto y sin ellos, la comprobación del alcance y puesta en valor de estas tecnologías, así como la obtención de las conclusiones necesarias para finalizar la investigación no habrían podido llevarse a cabo, por lo que constituyen parte fundamental del trabajo.

CSIC

9. 1 Estudio de casos realizados en el CSIC

Markus Bastir, científico titular y codirector de la presente tesis doctoral, trabaja en el departamento de Paleobiología del Museo Nacional de Ciencias Naturales (MNCN). Este departamento se encuentra integrado en el CSIC de Madrid (Museo Nacional de Ciencias Naturales, s.f.) y el doctor Bastir trabaja concretamente como director del Laboratorio de Morfología virtual, donde estudia las interacciones evolutivas y de desarrollo entre diferentes sistemas de órganos, así como la variación esquelética en humanos recientes y fósiles. En el laboratorio, las tareas principales se centran en escanear las piezas, establecer patrones sobre su forma y función a partir del archivo 3D y finalmente imprimir los resultados y las fisonomías resultantes (Rtve, 2015).

La autora de la presente tesis tuvo el placer de poder colaborar con el doctor Bastir en el desarrollo de diferentes proyectos del laboratorio. En esos momentos se estaba llevando a cabo una investigación (más adelante descrita en detalle) sobre el espécimen *Homo Naledi*, y una de las necesidades del estudio desarrollado por el equipo era incorporar una nueva pieza a la exposición permanente del MNCN: el facsímil del cráneo de *Naledi*.

En el laboratorio, además de este proyecto, se trabajaba con numerosas impresiones 3D (tal y como se verá más adelante), por lo que, en un primer momento, a la doctoranda se le encargó su postprocesado. El postprocesado de estas piezas es de vital importancia para facilitar su estudio por parte de los científicos. Gracias a estar piezas impresas, los científicos pueden manipularlas y estudiarlas sin tener que tocar los originales.

De este modo, dado el interés presentado por la autora de la presente tesis ante los numerosos proyectos en los que el equipo trabajaba, pronto se amplió esta colaboración participando en el desarrollo de otras investigaciones que sirvieron también como estudio de casos para esta tesis.

Las tareas principales desarrolladas consistieron, entre otras, en eliminar los soportes de las piezas, unirlos en caso de que el modelo hubiese sido impreso por partes, darles patinas para que se asemejasen a los originales o bien realizar el moldeo y vaciado de las impresiones. Estas tareas, que deben siempre ser llevadas a cabo por especialistas de conservación y/o restauración, fueron realizadas bajo supervisión de Markus Bastir y Alberto Riesco López. Este último se encontraba durante el curso académico 2016/2017

cursando su Máster Interuniversitario en Paleontología Avanzada. Su trabajo fin de Master llevaba por título *Métodos cuantitativos para la reconstrucción de la columna vertebral torácica en anatomía evolutiva humana* (Riesco, 2017) y realizaba la mayor parte de sus investigaciones en el laboratorio del CSIC.

El laboratorio trabajaba con diferentes impresoras, de las cuales debe mencionarse la Makerbot Replicator 2, puesto que fue la empleada para la impresión de todas las piezas con las que se trabajó.

Esta impresora es uno de los equipos 3D más exitosos de la compañía 3D Hubs. Presenta un chasis de acero, pantalla LCD con controles incorporados, conectividad de tarjeta SD y un volumen de construcción de 28.5 x 15.3 x 15.5 cm. Imprime con PLA con tecnología FDM. Cuenta con un cabezal extrusor y el diámetro de los filamentos de PLA son de 1.75 y la precisión de los ejes XY es de 11 micrones (3Dhubs, s.f.).



Fig. 311 Impresora MakerBot Replicator 2 del laboratorio de morfología virtual del CSIC. ©María Ávila Rodríguez.

A continuación, se describen cada uno de los proyectos desarrollados en el CSIC por la autora de la presente tesis.

9. 1. 1 Cráneo de *Homo Naledi*

Como ya ha sido explicado en líneas anteriores, el objetivo en este caso se centró en la realización de una reproducción con carácter didáctico y divulgativo de un cráneo que debía ser expuesto en el MNCN como parte de la exposición permanente del mismo. Hoy en día continúa siendo exhibido al público en la sala.

El cráneo objeto de estudio corresponde a un *Homo Naledi*, especie de homínido extinguido cuyos fósiles fueron reconocidos por primera vez en octubre de 2013.

Un equipo internacional de investigación formado por científicos de varias instituciones, tales como la Universidad de Witwatersrand de Johannesburgo en Sudáfrica, la Universidad de Nueva York en EE.UU. o el Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid, publicaron en la revista *eLIFE* el artículo *Homo Naledi, a new species of the genus Homo from the Dinaledi Chamber, South Africa* (Berger et al., 2015), donde se daba la descripción de *Homo Naledi*, una nueva especie de homínido. Los fósiles analizados pertenecían al Yacimiento de la cueva de Rising Star en Sudáfrica, de la cámara Dinaledi, y contenía los restos de un grupo de al menos 15 homínidos de esta especie en diferentes etapas de desarrollo (Museo Nacional de Ciencias Naturales, 2015). El descubrimiento fue registrado en la lista Top 10 de especies descubiertas en 2015 (Museo Nacional de Ciencias Naturales, 2016).

Las calotas, parte superior de la bóveda craneal, fueron escaneadas con un escáner 3D de la compañía NextEngine. Los escaneados fueron ajustados, alineados y unidos mediante el software HDStudio para obtener así el modelo tridimensional definitivo. Con los datos obtenidos se pudo obtener la capacidad craneal y estimar la masa corporal que rodeaba el cráneo (Berger et al., 2015).

Los estudios demostraron que a pesar de que el individuo tenía una capacidad craneal de alrededor de 500 cm³, mucho menor que la de humanos actuales, tenía características muy cercanas al género *Homo* en cuanto a masticación, manipulación y locomoción se refiere. Sin embargo, dada la estructura que presenta su torso y el juego del tórax con la pelvis, se acercaría más a *Australopithecus*, un género de primates homínidos que desapareció hace unos dos millones de años. El doctor Bastir explica que morfológicamente, los análisis sitúan a la nueva especie en el origen del género *Homo*. Además, ha sido posible

demostrar a partir de estos fósiles que la evolución de aspectos tan importantes como la manipulación y la locomoción se produjo independientemente de la encefalización, es decir, del aumento del tamaño cerebral. Este patrón refleja una morfología aparentemente de un homínido que vivió en la transición evolutiva entre el *Australopithecus* y el *Homo* (Bastir et al., 2017, p.112; Museo Nacional de Ciencias Naturales, 2015). Bastir aclara que el significado evolutivo es difícil de determinar por no conocerse la referencia de la edad geológica, pero si la edad de los fósiles fuera más antigua de 2,6 millones de años¹²⁶, datación del fragmento de mandíbula, los fósiles de *H. Naledi* serían la representación esquelética más completa de un grupo de homínidos y la más antigua del género *Homo*. Por otro lado, si su cronología fuera menor de 1 millón de años se demostraría la coexistencia en África de especies del género *Homo* muy diferentes entre sí (Museo Nacional de Ciencias Naturales, 2015).



Fig. 312 A la izquierda aparecen los fragmentos de los fósiles del cráneo y de la mandíbula del individuo 1 de *Homo Naledi* (DH1) vistos desde diversas perspectivas. A la derecha aparecen numerosos restos encontrados en el yacimiento. Es el yacimiento que ha proporcionado la mayor colección de fósiles de una única especie en el continente africano. ©Berger et al.

Como no podía ser de otro modo, dada la importancia del hallazgo, el cráneo debía ser expuesto en el MNCN, en la sala de Paleontología y Geología, concretamente en la zona de Evolución Humana. Sin embargo, lógicamente el original no podía exponerse, no solo porque no se encontraba en España, sino porque debía ser preservado para la investigación y el estudio del fósil, por lo que era preciso realizar un facsímil del mismo, que permitiese al público contemplarlo.

¹²⁶ A pesar de estos primeros datos, dos años después, en el 2017 los huesos se han datado, situándolos en un período comprendido entre los 236.000 y 335.000 años de antigüedad (Dirsk et al., 2017).

Para la realización de la reproducción se barajó la posibilidad eliminar el proceso de moldeo y vaciado de la pieza, que, como se recordará, habitualmente se sigue con las impresiones 3D que van a ser directamente expuestas. En este caso, y tal y como normalmente ocurre, la pieza impresa no reunía las características de color que presentaba el original (era monocromática) y la superficie plástica aportaba un brillo a la pieza que sería difícil de apagar, por lo que se decidió primero experimentar la viabilidad de patinar la impresión 3D y ver si realmente se le podía dar a una impresión 3D un acabado digno de una exposición permanente.



Fig. 313 Imágenes del cráneo de *H. Naledi* visualizadas desde la base de datos *Morpho Source*. ©Morpho Source.

De este modo, puesto que el laboratorio contaba con el archivo 3D del escaneado del cráneo, con el fin de realizar diferentes estudios, habían materializado repetidas veces con la impresora Makerbot Replicator 2 el cráneo. Todas estas impresiones fueron realizadas en diferentes tipos de filamentos de PLA y tenían un espesor de capa de 100 micras. Así, fue posible tomar como modelos para la realización de pruebas de pátina diferentes de las piezas impresas:

- Impresión a) Filamento warm grey.
- Impresión b) Filamento natural.
- Impresión c) Filamento glow.
- Impresión d) Filamento artic white.

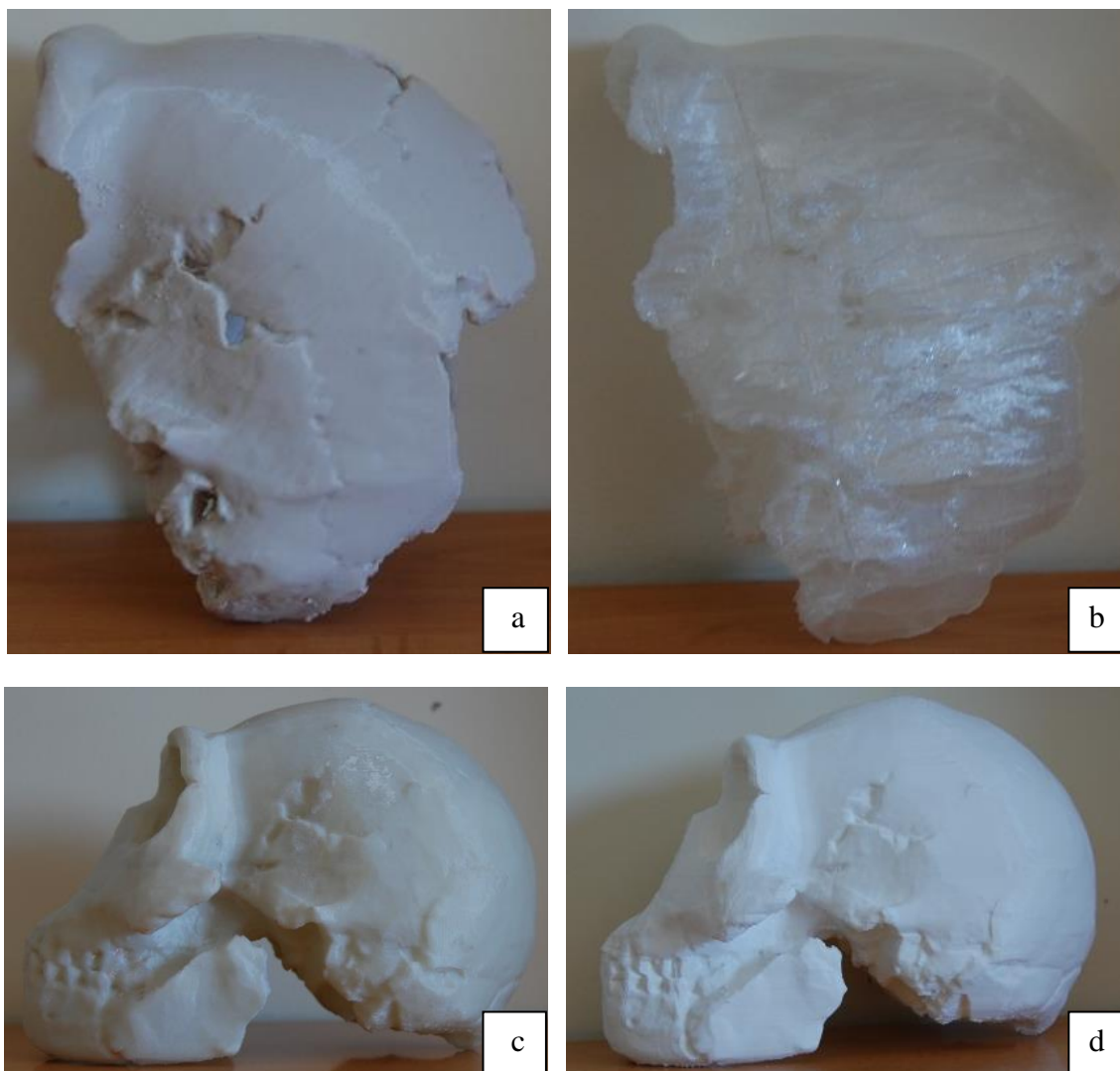


Fig. 314 Las imágenes hacen referencia a las 4 impresiones escogidas para realizar las pruebas de patinado: a) filamento warm grey; b) filamento natural; c) filamento glow fill y d) filamento artic white. ©María Ávila Rodríguez.

Para realizar las pruebas de color se preparó una pátina constituida por la mezcla de pigmentos aglutinados con barniz mate (0,1g de pigmento por cada 150 ml de barniz). Estos pigmentos eran tierras, óxidos de hierro y blanco de titanio.

En las impresiones se tomó una zona como referencia sobre la cual se aplicarían las mismas capas de la misma mezcla de la pátina escogida. La zona escogida se delimitó con rotulador permanente y se aplicó la pátina en dos capas, dejando secar entre la primera y la segunda aplicación 24 horas.

Cada impresión recibió la pátina de un modo diferente y diferentes fueron las conclusiones que se pudieron observar: en la prueba a) el problema vino dado por el brillo de la pieza, que al igual que en la b), aportaba de por sí al cráneo un exceso de brillo, algo totalmente desaconsejable cuando se trata de una facsímil de un fósil, puesto que el original jamás presentaría brillos, y mucho menos tan acusados; la prueba b) fue la que peores resultados obtuvo, puesto que, además del tono oscuro en que se convirtió la pátina, las zonas en las que existían diferencias acusadas en el relieve atraparon un exceso de la mezcla, lo que se reflejó acusadamente al secarse; de la prueba c) puede decirse que obtuvo buenos resultados puesto que el tono no varió mucho con respecto al deseado y por último, de la prueba d) se partía con un tono base más claro que el resto al ser blanco puro, por lo que el tono quedó más claro que el resto de las pruebas, sin embargo el tono quedó natural y pudo decirse que era un resultado aceptable.

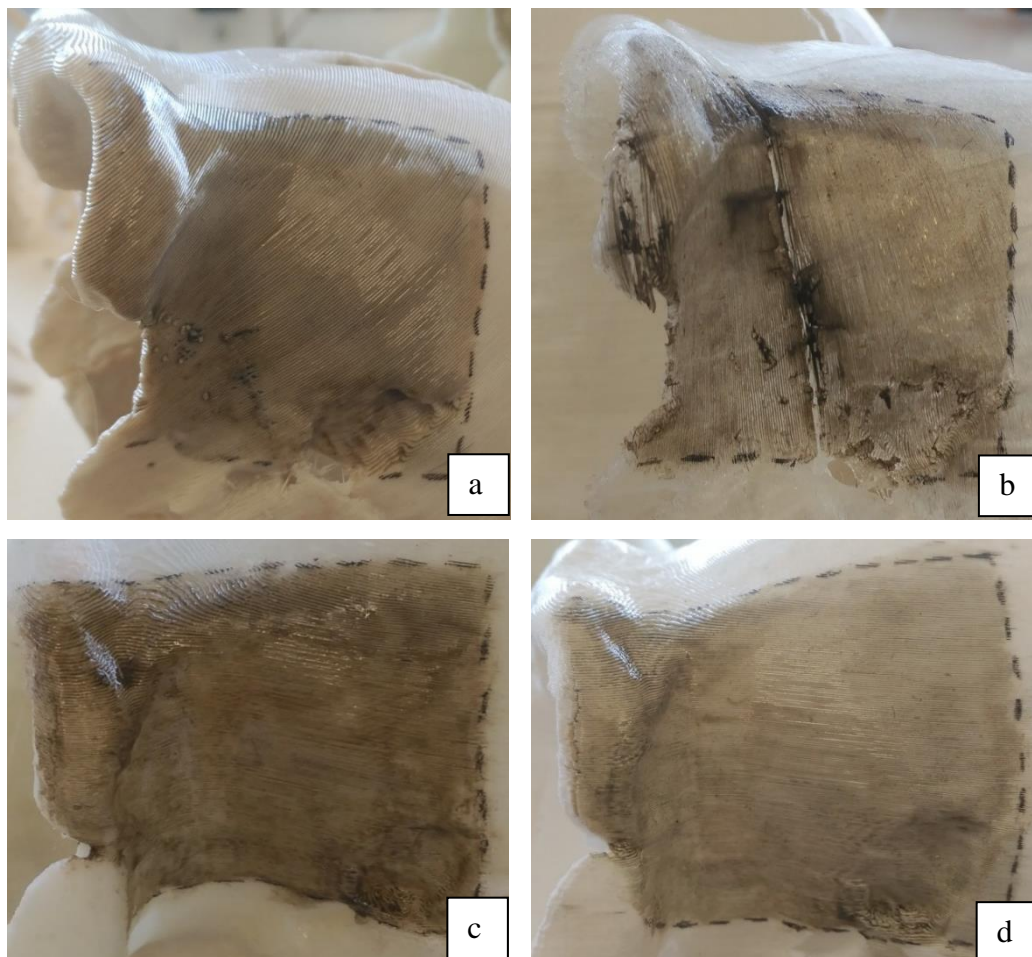


Fig. 315 Las pruebas muestran que cada material se comportó de un modo distinto al recibir la pátina. ©María Ávila Rodríguez.



Fig. 316 Imagen de todos los modelos con las pruebas aplicadas en el laboratorio. ©María Ávila Rodríguez.

Sin embargo, a pesar de que podría haberse trabajado con las pruebas c) y d), se consideraba que un modelo que iba a ser expuesto en un museo de tal relevancia como es el Museo de Ciencias Naturales del CSIC, exigía unos acabados de un nivel más elevado. Como se ha indicado, los modelos mostraban en sus superficies las marcas de la superposición del material con el que trabajaba la impresora en forma de capas, y al pintar sobre estas, el capeado se marcaba aún más puesto que en los recovecos la mezcla de la pátina quedaba atrapada.



Fig. 317 Muestra de las estratigrafías generadas en el proceso de impresión. ©María Ávila Rodríguez.

Se decidió entonces buscar el modo de eliminar este capeado, o al menos de rebajarlo. Para ello, se investigó en el mercado opciones para tales fines, como el XTC-3D®, que se encarga de eliminar las estratigrafías de las piezas impresas.

Para la realización de estas pruebas solo se emplearon las pruebas c) y d), es decir los dos cráneos impresos en glow fill y en artic white, ya que se disponía de una mayor superficie para realizarlas.

El producto XTC-3D® era, en esencia, una resina epoxídica. Este se presentaba en dos componentes líquidos (A) y (B) que debían mezclarse en las proporciones indicados por el fabricante (2A:1B), hasta obtener la mezcla homogénea que se aplicaba a pincel. El producto aplicado se adaptaba perfectamente a los huecos que la impresora dejó entre capa y capa, rellenándolos al catalizar la resina.



Fig. 318 Producto XTC-3D®. En la caja del producto vienen los dos componentes que deben ser mezclados para obtener el líquido viscoso. ©María Ávila Rodríguez.

Se decidió también probar la aplicación del mismo producto con un tono base que aportase coloración a la pieza, añadiendo para ello pigmento óxido de hierro natural.

De este modo finalmente se aplicó una capa del producto (sin añadir pigmento) en una zona concreta del cráneo y 3 diferentes capas (en otras 3 zonas) mezclando el producto con el pigmento. En cada una de las capas se fue añadiendo más pigmento, con el fin de obtener 3 tonos en escala de claro a oscuro, tal y como se indica en la tabla 3.



Fig. 319 Aplicando las pruebas con el producto XTC-3D® con un pincel. ©María Ávila Rodríguez.

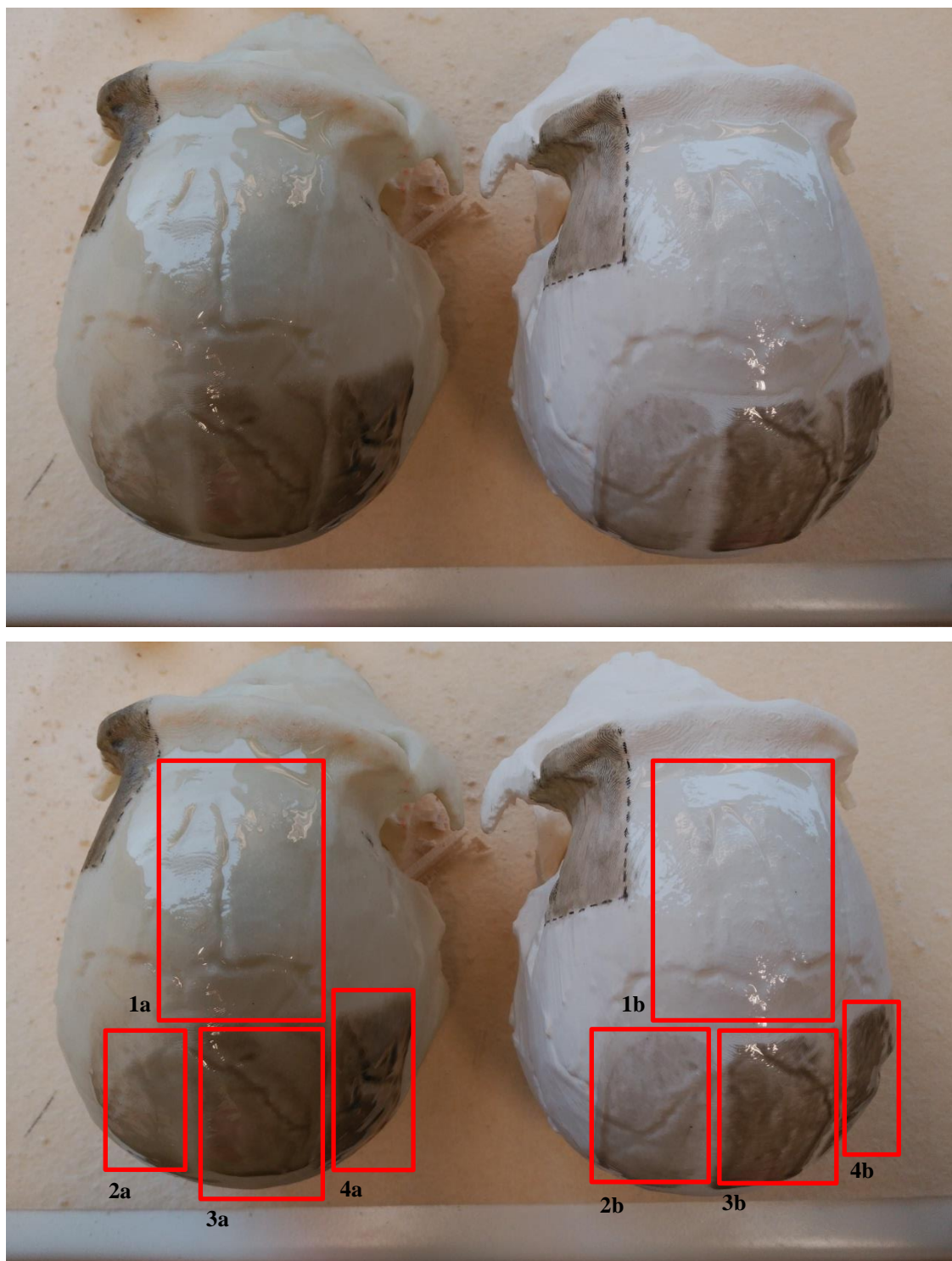


Fig. 320 En la imagen superior aparecen las 4 pruebas aplicadas sobre las 2 impresiones. La imagen inferior corresponde a un duplicado de la misma en la que aparecen señalizadas las muestras. El 1a y 1b corresponde a la aplicación del producto tal y como indica el fabricante, mientras que el 2a, 2b, 3a, 3b, 4a y 4b fueron aplicadas con pigmento, siendo el 2a y 2b el más claro, el 3a y 3b el tono intermedio y el 4a y 4b el tono más oscuro. ©María Ávila Rodríguez.

Muestras	Proporción XTC-3D®	Proporción Pigmento
1a y 1b	100%	0%
2a y 2b	99,93%	0,06%
3a y 3b	99,86%	0,13%
4a y 4b	99,80%	0,19%

Tabla 3. En la tabla puede verse las proporciones de XTC-3D® y de pigmento que se aplicaron en las muestras.
©María Ávila Rodríguez.

Tras dejar pasar el tiempo de curado que el fabricante establece para la resina epoxídica (2 horas a temperatura ambiente), los resultados obtenidos determinaron que:

- El producto aportaba un brillo que era contraproducente para el acabado necesario de la pieza (Fig.321 c). Como ya ha sido indicado, un cráneo, y menos aún un fósil, no puede presentar brillo puesto que su materia constitutiva, el hueso, no los presenta y constituye un material mate. Este problema podría probablemente subsanarse con la realización de un lijado manual de la superficie empleando una lija al agua, lo que apagaría dicho brillo como consecuencia de las fisuras que la lija generaría sobre la superficie. Sin embargo, el registro de la pieza se vería comprometido.
- La aplicación del producto no eliminaba realmente estas estratigrafías producidas por la impresora, sin embargo, si interfería en su textura, restando detalle a la información de la superficie que fue correctamente escaneada y posteriormente impresa, por lo que ese aspecto de hueso tan fielmente conseguido, se veía alterado al aplicar el producto.
- Se podía observar que el producto no había catalizado del todo. La mezcla fue correctamente medida y mezclada, por lo que puede ser que al aplicarse sobre determinados materiales se produzcan reacciones que impidan la correcta catalización de la resina. Como consecuencia, 3 meses después de la aplicación del producto, este se encontraba aún mordiente, es decir, presentaba cierta pegajosidad, y atrapó pelusas que volarían por el aire a consecuencia de otras intervenciones realizadas en el laboratorio (Fig.321 a). La muestra quedó por tanto sucia y sin catalizar por completo.
- Al aplicarse en la zona trasera del cráneo, el producto descolgó y goteó puesto que se trataba de una pared vertical (Fig.321 b). En caso de emplear el producto debería

tenerse en cuenta la posición de la pieza para su aplicación, siendo necesario cambiar de posición si se trata de un bulto redondo con suficientes desniveles como para que esta gotee.

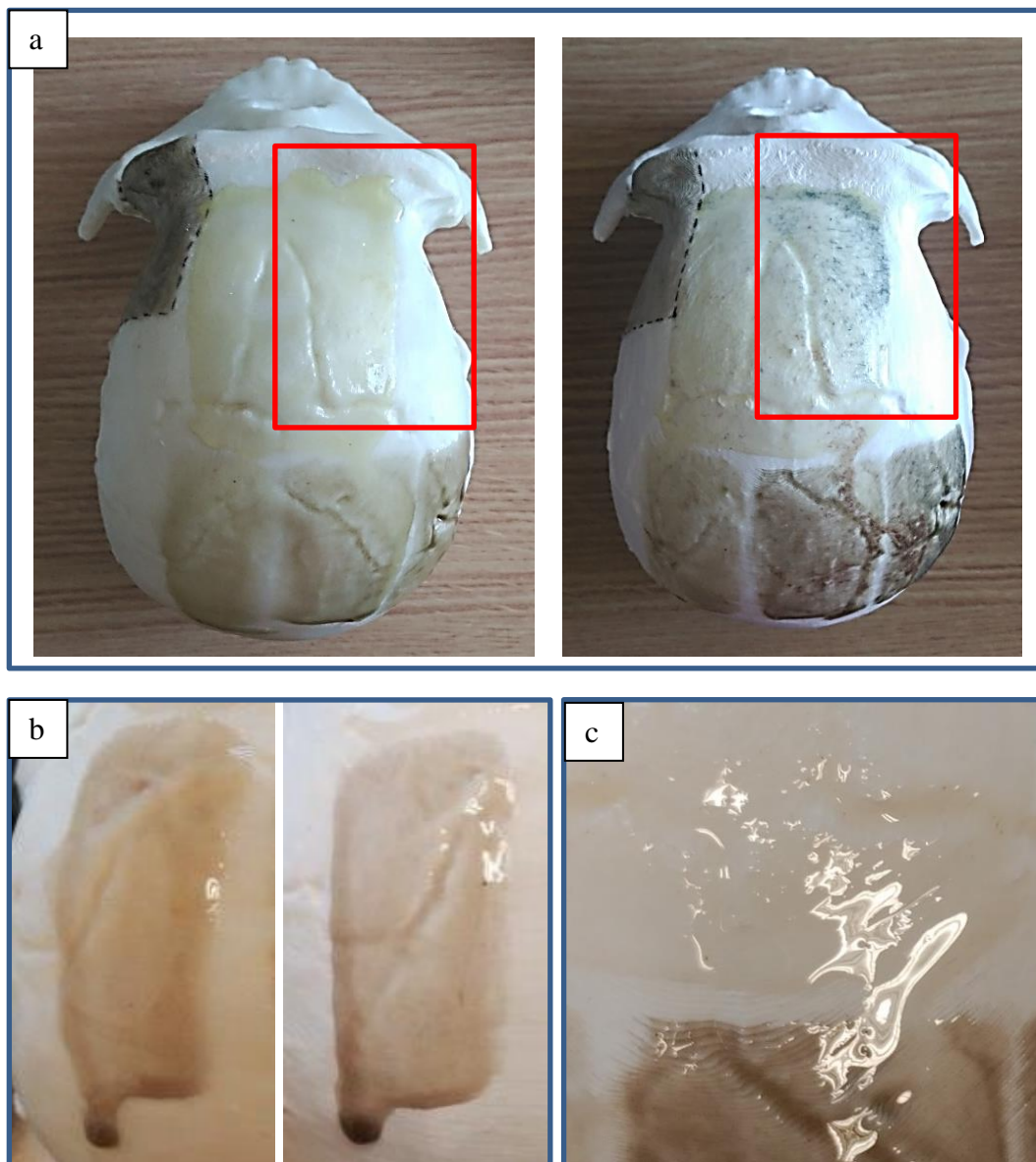


Fig. 321 Las imágenes superiores (a) muestran las dos fotografías tomadas 3 meses después de la aplicación de las pruebas. En la imagen de la derecha puede apreciarse cómo la muestra 1b había atrapado las pelusas. Las imágenes inferiores a la izquierda (b), muestran el goteo del producto en las pruebas 2a y 2b sobre la superficie de la pieza. A su derecha (c), se muestra un ejemplo de los brillos que el producto aportó a la pieza. ©María Ávila Rodríguez.

Ante la gran cantidad de inconvenientes que el producto acarreó en este caso, se decidió descartar su uso, puesto que no aportaba ventajas ni mejoras al proyecto. Probablemente el producto sería útil en otro tipo de modelos en los que no impontase tanto el registro de la superficie de la pieza, ni el brillo que este aporta y solo sea imprescindible tapar las estratigrafías generadas por las impresoras.

Tras la realización de todas las pruebas recientemente referidas, finalmente se probó otra metodología: la realización de un molde. Para realizar un molde, la metodología tradicional emplea silicona aplicada directamente sobre el modelo a reproducir, pero, en los fósiles, dadas las características que presentan y su delicado estado de conservación, se presenta completamente inviable que se trabaje directamente sobre ellos. Por ello el procedimiento a seguir consistió en realizar un molde de la impresión de la pieza para posteriormente vaciarlo puesto que se había comprobado que el patinado directo sobre la pieza no aportaba resultados precisos para el fin al que iba a ser destinado el modelo. Con la realización del molde y el posterior vaciado, se eliminarían los anteriormente citados inconvenientes derivados de aplicar una pátina directa sobre la impresión. De este modo, si de esta impresión se realizaba un molde y después el vaciado con su color definitivo, no sería necesario aplicar una pátina el vaciado final. Aun así y, como se ha indicado, debía tenerse en cuenta que el molde obtenido registraría la estratificación de la pieza, por lo que debía tenerse en cuenta a la hora de realizar el vaciado y comprobar si era o no factible el procedimiento.

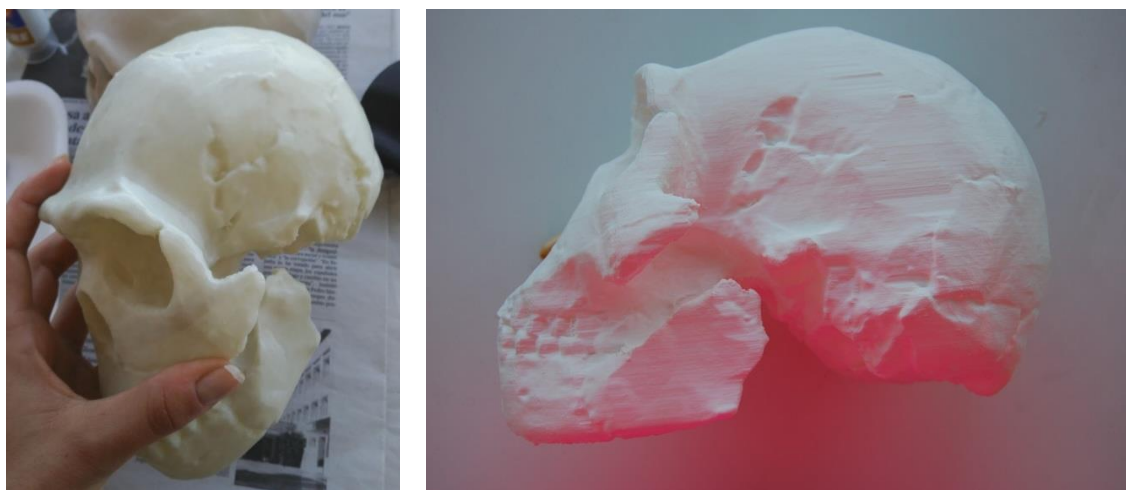


Fig. 322 Ejemplo de los cráneos que fueron inspeccionados con el fin de escoger la mejor opción. ©María Ávila Rodríguez.

La principal función del modelo a reproducir era, como ya se ha indicado, ser expuesto en el Museo de Ciencias Naturales, por lo que solo era necesario reproducir la información visual; siendo en este caso el tacto y la acústica de la pieza irrelevantes, dado que no aportarían información en la exposición.



Fig. 323 En la imagen aparece el cráneo escogido fotografiado desde diferentes vistas.
©María Ávila Rodríguez.

Una vez escogido el modelo sobre el que trabajar, era el que presentaba una mejor calidad de impresión, se procedió al moldeo de la pieza. El proceso incluyó 3 fases que a continuación serán desarrolladas:

- Realización del molde de silicona, para obtener el registro de la superficie;
- Realización del contramolde de escayola, que aportaría rigidez al molde flexible, a fin de que este mantenga el registro de la silicona convenientemente.
- Realización del vaciado de la pieza, con resina, pigmentos y cargas, dando lugar a diferentes acabados.

Antes de comenzar con el molde, se eliminaron pequeños desperfectos que el cráneo presentaba. Estos desperfectos podrían haberse generado durante la fase de registro, durante el postprocesado, o bien haber sido generados por la propia impresora 3D. En cualquier caso, puesto que eran fáciles de solventar, se procedió a retocarlos antes de realizar el molde para que no quedasen registrados en la silicona y, por consiguiente, reproducidos en el vaciado. Para su eliminación se empleó un microtorno y bisturíes.

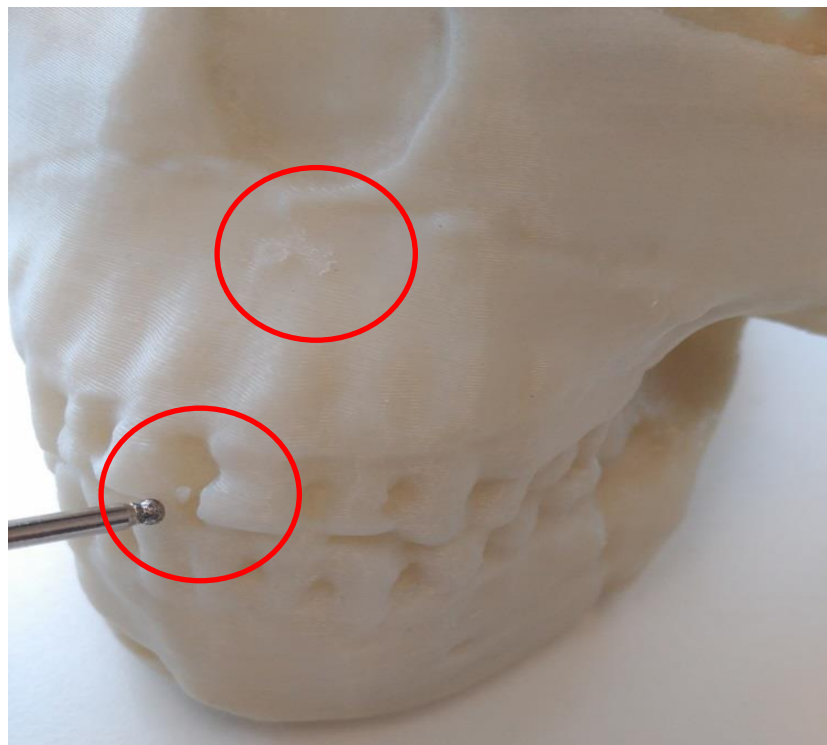


Fig. 324 El círculo situado en la parte superior de la imagen muestra uno de los defectos que fue retirado mediante el empleo de microtorno. El círculo inferior muestra otro de los defectos que aún no habían sido eliminados, justo en el momento en el que el microtorno iba a incidir sobre él. ©María Ávila Rodríguez.

Cuando la pieza se encontraba lista para su moldeo, se diseñó el molde y se decidieron las piezas de las que este se compondría. Lo ideal en la realización de un molde es que este tenga el menor número de piezas posible ya que, de este modo, el vaciado tendrá un menor número de juntas que habrán de ser repasadas. Sin embargo, la morfología de este modelo obligó a realizar 3 piezas. Se decidió que la parte 1 del molde fuese la zona parietal, la de atrás del cráneo, siendo de este modo la base del cráneo el primer punto de apoyo que se emplearía en la construcción del molde.

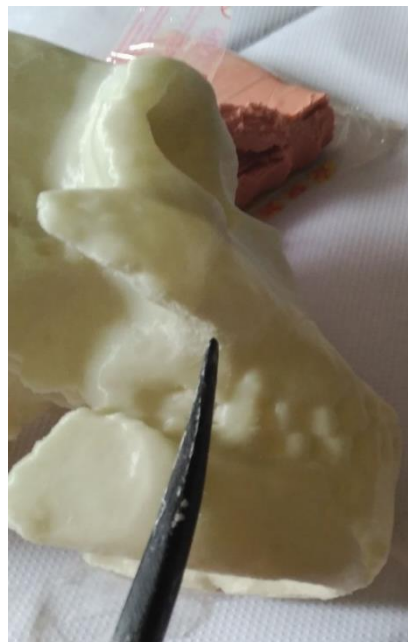


Fig. 3251 seleccionando las piezas del molde. ©María Ávila Rodríguez.

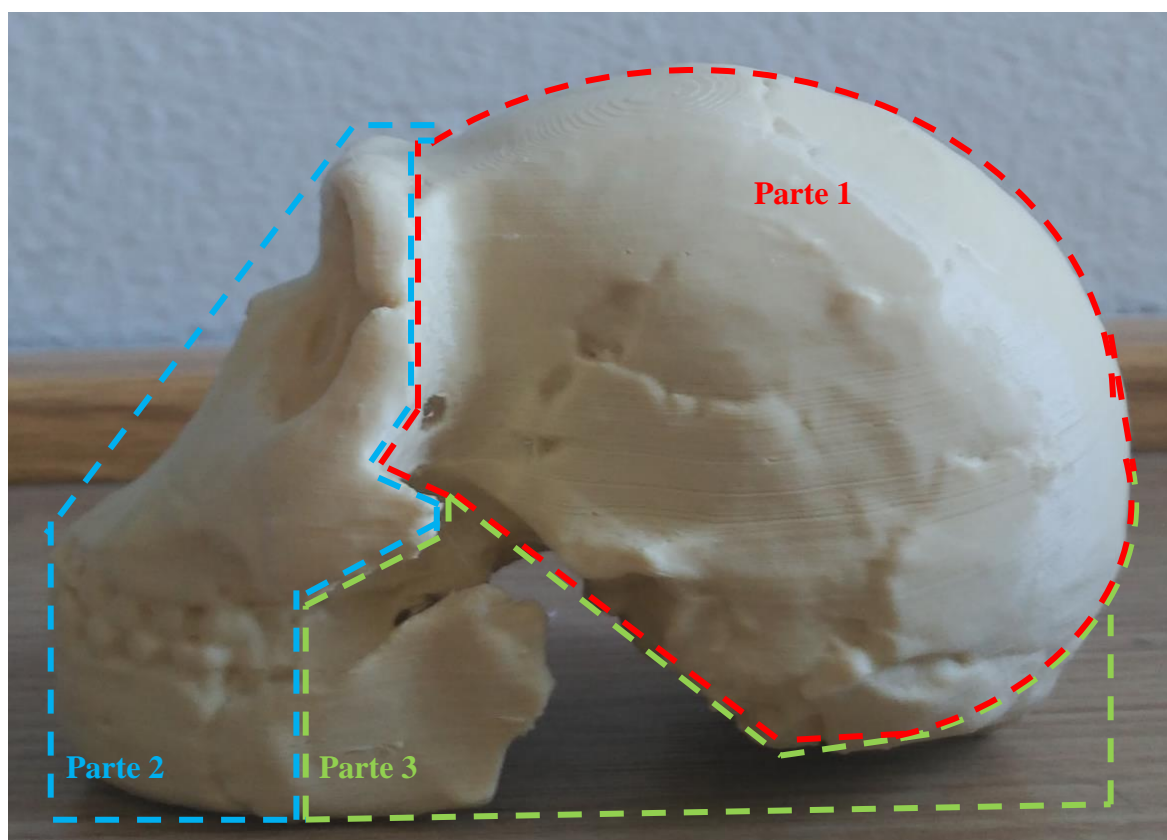


Fig. 326 Configuración del molde en 3 piezas diferentes. ©María Ávila Rodríguez.

Para comenzar el molde se rodeó con una plancha de plastilina la zona que configuraría la pista de la parte 1 del mismo. Una vez toda la parte 1 había sido correctamente delimitada con la plastilina y la ayuda de palillos de modelar, tuvo que tenerse en cuenta que dada la prominente inclinación de la parte 1, la silicona se descolgaría y no quedaría fija. Fue por tanto necesario la construcción de un encofrado, lo que serviría tanto para mantener la silicona en su sitio como para la realización del contramolde. Con la pieza ya rodeada se colocaron las colas de milano y cuando el encofrado y las colas de milano estaban listas por completo, se preparó la silicona para realizar la primera y fina capa de registro, que se dejó caer directamente sobre la pieza.

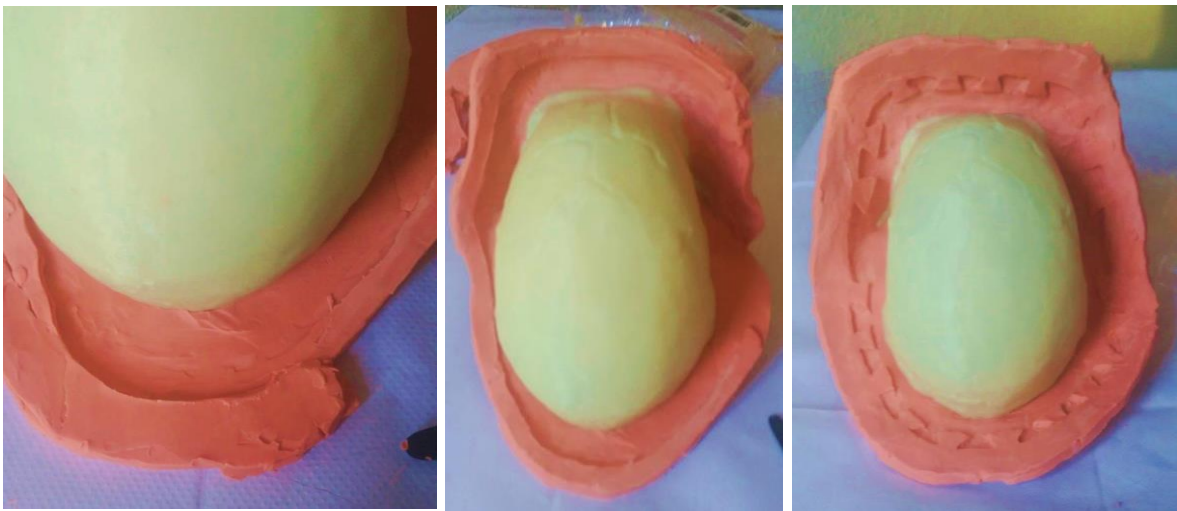


Fig. 327 Proceso de realización del encofrado y las colas de milano. ©María Ávila Rodríguez.

Para el proceso se empleó una silicona bicomponente de condensación con una viscosidad de 25000 mPa.s., lo suficientemente baja como para que tuviese una alta capacidad de registro de la textura de la superficie de la pieza. Como agente de curado se empleó un derivado del estaño, con un tiempo de trabajo de 90 a 120 minutos y un tiempo de curado de 24 horas (Santos, 2017a, p.104). En concreto fue empleada la silicona comercializada por Ferocha S.A., Silastic 3481 y su agente de curado 81. Ambos componentes se mezclaron tal y como indicaba el fabricante, 100:5, es decir, silicona base: agente de curado.

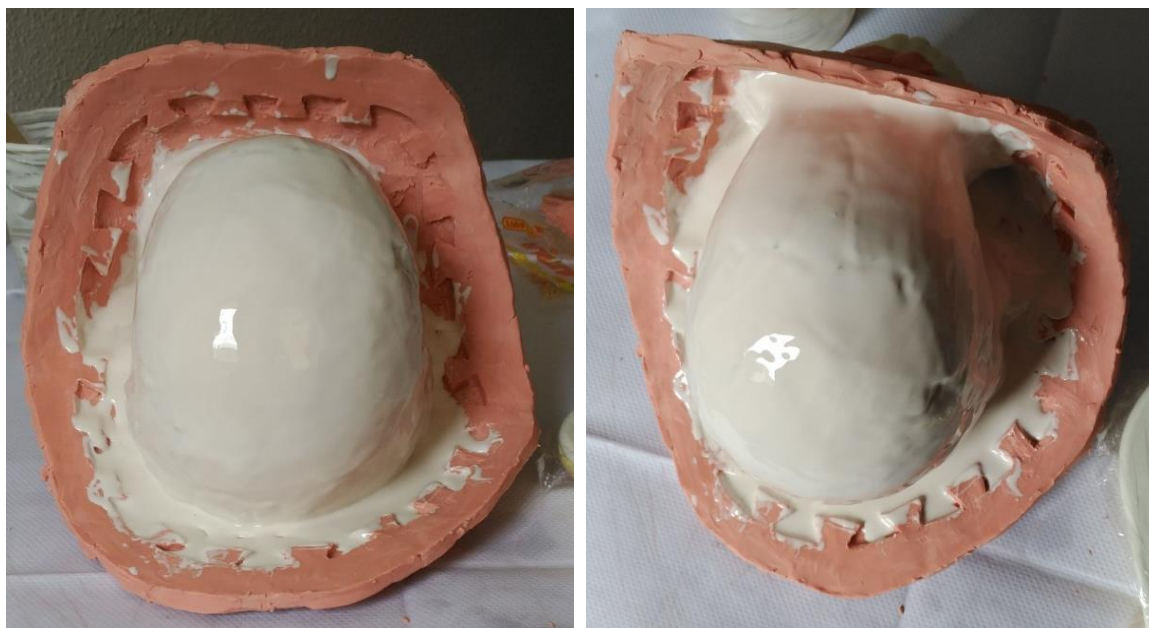


Fig. 3282 Aplicación de la primera capa de registro. ©María Ávila Rodríguez.

Se dejó curar esta primera capa y se aplicó una segunda para engrosar el molde y que este tuviera 3 o 4 mm de grosor, añadiendo esta vez en la mezcla, agente tixotrópico con el fin de aumentar la viscosidad de la mezcla. Para mezclar la silicona con este último, se mezcló primero la silicona con el agente de curado y posteriormente se le añadió el tixotrópico para que no descolgase. Con el fin de conseguir que la silicona quedase distribuida uniformemente, y antes de que finalizase el tiempo de trabajo, se empleó un espátulín envuelto en papel mojado, de modo que la silicona no se adhiriese al papel. Con él se fueron dando ligeros toques sobre la silicona para aplacar las crestas y conseguir la uniformidad deseada. De este modo, la superficie quedó rugosa pero no tan irregular como recién aplicada la silicona y, posteriormente la carcasa de escayola y el molde de silicona tendrían el encaje adecuado.

Una vez la silicona estaba curada, se retiró la capa de plastilina con la que se habían construido el encofrado y las colas de milano, dejando únicamente la plastilina que constituye el plano de junta. Se recortaron las colas de milano con unas tijeritas para que su forma fuese más regular y eliminar las rebabas causadas por las fugas de la silicona.



Fig. 329 La imagen de la izquierda muestra la silicona de la primera parte del molde ya aplacada mientras que a la derecha aparece la silicona de la primera parte del molde con las colas de milano recortadas. ©María Ávila Rodríguez.

Cuando las colas de milano habían sido recortadas, se procedió a aplicar la escayola que constituiría la parte rígida de esta primera parte del molde. Se preparó escayola y se cubrió la silicona, hasta llegar al límite de la pista.



Fig. 330 Carcasa de escayola de la primera parte del molde vista de frente y desde atrás. ©María Ávila Rodríguez.

Cuando la escayola había endurecido por completo fue repasada con escofinas para conseguir que el molde fuese más uniforme y conseguir crear una base plana para que pudiera apoyarse sobre la mesa de trabajo. Se le dio entonces la vuelta al molde para realizar siguiente pieza, correspondiente a la zona frontal de la pieza. Igual que en la primera parte, se construyó una pista de plastilina con su encofrado y sus colas de milano, y antes de aplicar la silicona, se cubrieron con vaselina todas las colas de milano y la silicona y los márgenes de la escayola de la primera parte del molde, para que no se adhiriesen a esta segunda parte. Se aplicaron entonces las dos capas de silicona siendo la primera de ellas de registro y la segunda para engrosar el molde, dejando transcurrir 24 horas entre la aplicación de una y otra. Con las dos capas de silicona curadas se retiraron las colas de milano de plastilina y se recortaron las de silicona, para aplicar la carcasa de escayola. Una vez la escayola había fraguado se repasó como en primera parte del molde.



Fig. 331 A la izquierda pueden observarse las colas de milano listas para recibir la nueva silicona. Cuando se había aplicado la primera capa de silicona, se metieron en cada una de las oquedades oculares del cráneo un trozo de espuma de poliuretano, con el fin de minimizar la cantidad necesaria de silicona y facilitar su extracción a la hora de realizar los siguientes pasos. A la derecha aparecen las dos capas de silicona ya curadas y las colas de milano perfectamente recortadas y listas para recibir la escayola. ©María Ávila Rodríguez.

Cuando las dos partes del molde estuvieron terminadas, quedaba únicamente la tercera y última parte, que completaría el proceso de moldeo del cráneo. El proceso realizado en las otras dos partes del molde se repitió y se obtuvo por fin, el molde completo.



Fig. 332 La secuencia de imágenes muestra el proceso de realización de la última parte del molde: a la izquierda aparecen la parte 1 y 2 del molde ya terminadas. La pieza que aparece en la parte inferior era la parte 1 mientras que la de la parte superior correspondía a la parte 2. En medio, el hueco libre, correspondía a la base del molde, sería la parte 3 del mismo. Seguidamente pueden verse las colas de milano de plastilina listas para recibir la silicona; y, por último, a su derecha, el molde ya completo. ©María Ávila Rodríguez.

Con las tres partes del molde listo, podía por fin abrirse el molde y extraerse la pieza del interior para realizar el vaciado.



Fig. 333 A la izquierda aparece el molde comenzando a abrirse, con el cráneo aún dentro. A la derecha pueden apreciarse las 3 partes del molde separadas una vez este había sido abierto por completo y el cráneo extraído del interior del molde. ©María Ávila Rodríguez.

Era entonces el momento de realizar el vaciado definitivo, para lo que se empleó, puesto que se trabajaría aplicando la resina en capas y no por colada, una mezcla de resina epoxídica para laminados, Epofex EX402 y su endurecedor E-430, con filtro UV para favorecer la estabilidad de la reproducción y evitar su amarilleamiento. Además, se empleó bentonita, en concreto Bentone SD®, espesante de la mezcla que permitiría aplicarla sobre la pared del molde con espátula y que esta no descolgase. Se añadieron también pigmentos

en polvo escogidos previamente para conseguir los tonos adecuados para de un fósil recién extraído de una excavación. Antes de poner la mezcla sobre el molde, se aplicó sobre él pigmento en polvo mediante la utilización de un pincel y directamente sobre la silicona, con el fin de aportar tonalidad a la pieza de un modo más natural. Pintando el molde y extrayendo la pieza ya pintada se evita pintar el vaciado una vez extraído del molde y de este modo no se pierde el registro de la silicona. La reproducción, en este caso, resultaría menos fidedigna.



Fig. 334 Pigmentos empleados para pintar el molde y para mezclar con la resina. ©María Ávila Rodríguez.

Como ya ha sido explicado en casos anteriores, cuando los pigmentos se aplican en seco con un pincel sobre la silicona para posteriormente añadir la resina, esta atrapa el color y lo fija cuando cura.

Una vez estuvo pintado por completo el molde, se aplicó la resina en todas las partes del mismo, cubriendo toda la superficie con la mezcla. En los laterales de los límites de las piezas se aplicó más mezcla con más bentone, configurándose así un cordón de sellado que, por supuesto, debía ser del mismo tono que el color empleado para rellenar el molde, pero espesando la resina con más cantidad de bentonita para asegurar que la mezcla del interior no se



Fig. 335 Proceso de aplicación del color al molde. En la última imagen (inferior derecha) la resina y el cordón de sellado han sido aplicados en toda la pieza 1 del molde. ©María Ávila Rodríguez.

escapase. Se aplicó de nuevo vaselina en la zona de la escayola próxima a la resina, puesto que, si ésta desbordaba el hueco del molde, las partes constituyentes de la carcasa de escayola podrían quedar adheridas, lo que dificultaría el proceso de apertura del molde. Cuando el

molde se cerró, fue presionado con gomas para que las juntas ajustasen lo más correctamente posible. De este modo, éstas se notarían menos en el vaciado.

Transcurridas 72 horas, tiempo de endurecimiento indicado por el fabricante, se abrió el molde y extrajo la pieza. Se eliminaron entonces con un bisturí las rebabas de la resina sobrante.



Fig. 336 Proceso de eliminación con el bisturí del sobrante que había rebosado de las juntas. ©María Ávila Rodríguez.

Como puede observarse, los tonos de las juntas donde las rebabas habían sido eliminadas con el bisturí, presentaban variaciones de color. Por ello, para igualar los tonos se emplearon Colores Gamblin, fabricados con resina urea-aldehído, muy empleados en restauración para reintegraciones cromáticas por su especial estabilidad.

El resultado alcanzado finalmente fue muy satisfactorio. Como la pieza se situaría dentro de una vitrina, no se aprecian para nada las estratigrafías generadas por la impresora en el modelo reproducido y la pieza tiene la total apariencia de fósil.

De este modo el cráneo se ubicó en junio del 2016 en el MNCN, en la sala de Paleontología y Geología, en la zona de Evolución Humana del museo, donde forma parte de la exposición permanente del museo.

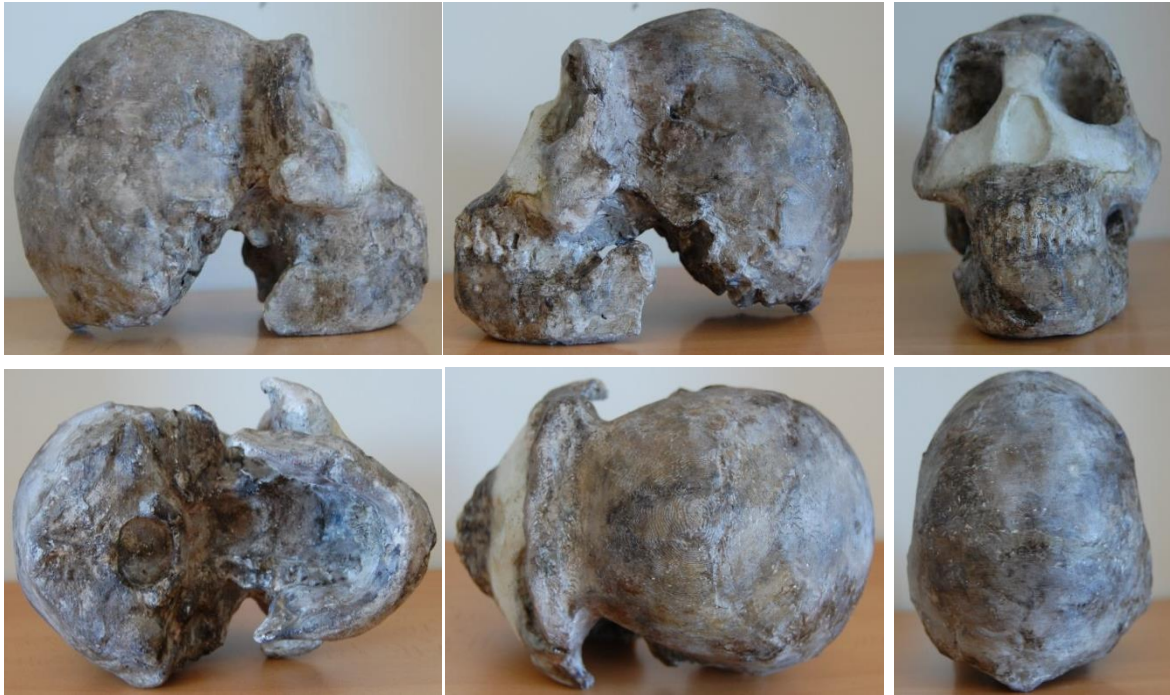


Fig. 337 Resultado final del cráneo. ©María Ávila Rodríguez.



Fig. 338 Cráneo expuesto en el Museo Nacional de Ciencias. ©Carlos Rosillo.

9. 1. 2 El tórax

El siguiente caso de estudio consistió en aplicar una pátina a una impresión de un tórax perteneciente a un *Neandertal*.

A pesar de la enorme cantidad de investigaciones llevadas a cabo, los científicos todavía tienen dudas sobre quienes fueron los *Neandertales* y buscan determinar las diferencias entre estos y los humanos modernos. Una de las grandes incógnitas hace referencia a la estructura articulada del esqueleto de *Neandertal* y cómo se compara con el de un ser humano moderno. Aunque esta cuestión había sido abordada en numerosas ocasiones, nunca se había reconstruido un esqueleto de *Neandertal* completo y articulado empleando las copias de piezas de huesos reales dada la escasez de material fósil esquelético y especialmente la falta de individuos completos. Por ello, se han producido muchas reevaluaciones de la historia, la inteligencia, la postura y la mecánica de los *Neandertales*, que a veces han dado lugar a concepciones artísticas que conformaron la imagen que la cultura popular tiene del *Neandertal*. Sin embargo, estos estudios y recreaciones se basaron casi universalmente en elementos esqueléticos fósiles individuales y cuando se reconstruyeron cuerpos enteros, se extrajeron elementos fósiles de esqueletos homólogos de las poblaciones humanas modernas, en lugar de combinar elementos de *Neandertales*. En un intento de proporcionar una comprensión más objetiva de la estatura y la biomecánica del *Neandertal*, en 2002 se inicia un proyecto para reconstruir y articular un esqueleto completo del mismo. En las etapas iniciales del proyecto, era evidente que ya existía un enorme cuerpo de trabajo que describía la estatura y la forma de los *Neandertales*. En particular, varias teorías describían la forma del tórax y la pelvis; sin embargo, estos elementos esqueléticos



Fig. 339 Reconstrucción de *Neandertal* (izquierda) junto a un esqueleto humano moderno (derecha) para su comparación. ©Wiley-Liss,

específicos nunca habían sido descritos como un conjunto reconstruido y articulado. La mayoría de las aceptaciones se basaban en mediciones tomadas de huesos individuales y en comparación directa con la anatomía humana moderna, sin embargo, es siempre crucial considerar el individuo al completo.

Uno de los dilemas más interesantes sobre la morfología del esqueleto de los *Neandertales*, que ha sido una importante fuente de controversia, es el hecho de que muchas dimensiones postcraneales (partes del cuerpo que se encuentran detrás de la cabeza) caen dentro del rango de la variación humana moderna por lo que, con estas imitaciones, era difícil sacar conclusiones referentes a las divergencias significativas entre los *Neandertales* y los humanos modernos. La base de la reconstrucción fue el esqueleto de *La Ferrassie 1* dada su disponibilidad, su integridad general y la notable conservación de su superficie. Los elementos faltantes fueron completados a partir otras colecciones de reproducciones en yeso de fósiles de individuos de *Neandertal*. Esta reconstrucción de Neanderthal, realizada por Sawyer y Maley, se encuentra actualmente en exhibición en el DNA Learning Center en Nueva York y en el 2003 fue también incorporada a la exhibición de *The First Europeans: Treasures from the Hills of Atapuerca*, en el Museo Americano de Historia Natural (Sawyer & Maley, 2005, pp.23-25).

Este modelo al completo se encuentra disponible a la venta en *Bone Clones, Inc., Osteological Reproductions*¹²⁷, y puede ser adquirido por 13,900\$ o bien su versión desarticulada, por 8800\$ (Bone Clones, Inc., 2007). El modelo es el que fue exhibido en la exposición de Atapuerca en el 2003 y fue también comprado por el MNCN de Madrid, que cuenta con dos reproducciones, uno en la



Fig. 340 Esqueleto *Neandertal* articulado de Bone Clones. ©Bone Clones, Inc.

¹²⁷ Empresa citada anteriormente en el capítulo 6

exposición permanente y otro en el departamento de paleobiología.

Y este último modelo es, precisamente el que Markus Bastir y el entonces investigador, Daniel García-Martínez¹²⁸ escanearon para trabajar sobre él, tal y como será descrito en detalle a continuación, en el estudio del tórax del *Neandertal*. Para ello emplearon los escáneres NextEngine, Artec MHT y Spider.

La reconstrucción de la morfología de la caja torácica de *Neandertal* no solo proporciona información sobre la evolución general de la forma del cuerpo humano, sino que también ayuda a comprender la anatomía de este. Sin embargo, como ya ha sido comentado, a pesar de esta importancia paleobiológica existen aún controversias y debates sobre la naturaleza y el alcance de las variaciones en el tamaño y la forma del tórax de *Neandertal* (Bastir et al., 2015, p. 64). De este modo, el estudio del tórax de *Neandertal* ha atraído la atención de la comunidad científica durante más de un siglo. Se acordó que los *Neandertales* tienen un tórax más amplio que los humanos modernos, sin embargo, la causa es aún debatida y es clave para comprender la biomecánica respiratoria y la forma de su cuerpo. La naturaleza frágil de las costillas, la estructura metamérica (repetitiva) del tórax y las dificultades para cuantificar la morfología del mismo, contribuyen a la incertidumbre sobre aspectos precisos de la caja torácica de los *Neandertales*. El grupo de paleoantropología del MNCN, al que pertenece el Markus Bastir, ha realizado numerosas investigaciones sobre material de *El Sidrón*¹²⁹, sitio arqueológico de Asturias en el que aparecieron numerosos restos de tórax. El grupo de investigación comparó estos restos con costillas de humanos modernos recientes, así como con humanos modernos fósiles y otros *Neandertales* a través de métodos morfométricos tradicionales y morfometría geométrica 3D¹³⁰, combinados con la estimación de los datos faltantes que fueron reconstruidos de

¹²⁸ Daniel García Martínez se encontraba en el momento en que dicho esqueleto fue digitalizado, realizando su tesis doctoral, actualmente ya defendida, titulada *Contribuciones al conocimiento de la variabilidad morfológica, funcional y evolutiva del esqueleto torácico humano*.

¹²⁹ Desde que en 1994 se descubrió el primer fósil de un *Neandertal* en la cueva del Sidrón, se han extraído más de 2.500 fósiles de trece individuos, siete adultos y seis menores, de una misma familia. La cueva es considerada el mejor yacimiento del mundo para estudiar el ADN *Neandertal* (Corbella, 2017).

¹³⁰ La morfometría constituye el estudio cuantitativo de la variación de las formas biológicas (Bookstein, 1996, p.31). El método emplea principalmente, dos tipos de información: la homología biológica (correspondencia de partes concretas entre individuos) y la localización geométrica (tiene en cuenta la configuración de la estructura de interés en el espacio). La morfometría 3D, por su parte, precisa lógicamente de información 3D, es decir, los elementos que van a ser analizados y estudiados a través de diferentes softwares deben estar virtualizados. La metodología 3D emplea *landmarks*, definidos como lugares anatómicos que no alteran su posición topológica relativamente a otros landmarks, suponen una cobertura adecuada de la forma y pueden ser ubicados fácil y repetidamente entre un organismo y otro, permitiendo observar los resultados de los análisis multivariantes de forma visual mediante configuraciones de landmarks, y no solo como meros gráficos y resultados numéricos (Riesco, 2017, pp.20 y 21).

forma virtual. Los resultados mostraron que los *Neandertales* tienen cabezas de costillas y tubérculos articulares más grandes que sus homólogos humanos modernos. Las primeras costillas *Neandertales* son más pequeñas que en los humanos modernos, mientras que las quinta y undécima costillas son considerablemente más grandes. Posteriormente,



Fig. 341 Comparativa de las costillas de los restos fósiles de los *Neandertales* del Sidrón con las de humanos modernos juveniles (a, d) y adultos (e, j). Los contornos discontinuos marcan el límite original de los huesos. ©Markus Bastir, Daniel García-Martínez, Almudena Estalrich, Antonio García-Tabernero, Rosa Huguet, Luis Ríos, Alon Barash, Wolfgang Recheis, Marco de la Rasilla & Antonio Rosas.

articulaban las costillas medias con sus correspondientes elementos vertebrales, y observaron que, en comparación con los humanos modernos, el tórax de *Neandertal* se expande mediolateralmente en todos los niveles. De este modo se planteó la hipótesis de que la expansión volumétrica del tórax de *Neandertal* propuesta por autores previos, se producía principalmente por una expansión mediolateral del tórax (García-Martínez et al., 2017, pp.85 y 86). En la evolución humana, el sistema respiratorio es particularmente interesante, puesto que la respiración proporciona el vital oxígeno tan necesario por el organismo. Por lo tanto, es relevante para diferentes aspectos de la paleobiología de homínidos. Los patrones de actividad física, la forma del cuerpo y la masa y los factores ecológicos están intrínsecamente relacionados con el sistema respiratorio. Altamente interesante es, en este contexto, el tamaño y la forma del tórax de *Neandertal*. El equipo de Bastir empleó la morfometría geométrica tridimensional con el fin de comparar la caja torácica de la reconstrucción de Sawyer y Maley con una serie de diferentes reconstrucciones tridimensionales de tórax de humanos modernos en crecimiento, recién nacidos y adultos (Bastir, García Martínez, Coquerelle, Barash & Recheis, 2012, p.14).

En su búsqueda para encontrar más información sobre la evolución del tórax, el doctor Bastir, tras el descubrimiento de *H. Naledi* (recordando caso de estudio anterior), exploró también el tórax de este y fue invitado al *86th Annual Meeting of the American*

Association of Physical Anthropologists, que sería llevado a cabo en Nueva Orleans en el 2017 (Bastir et al. 2017, p.112).

Con el fin de facilitar la comprensión de los asistentes a la conferencia, el doctor Bastir quería mostrarles una reproducción del tórax de un *H. Neandertal*, por lo que trabajó empleando archivo 3D obtenido con el escaneado realizado, citado en líneas anteriores, del modelo de Sawyer y Maley que el museo tiene. Del archivo 3D se seleccionó el tórax y se imprimió en la impresora Makerbot R2 en PLA, en el filamento warm grey, a una escala de 50:100, es decir, reduciendo el tórax a la mitad de su tamaño con el fin de poder manejarlo mas facilmente en el viaje que el Doctor Bastir realizaría para llegar desde Madrid hasta Nueva Orleans. Con el modelo se buscaba mostrar como era el tórax de un *H. Neandertal* con el fin de compararlo y apoyar el discurso científico sobre el *H. Naledi*, por lo que el modelo físico serviría de apoyo para aclarar ideas.

Si bien es cierto que el tórax podría llevarse a la conferencia tal y como salía de la impresora, eliminando eso sí, los soportes de impresión, se valoró positivamente que su aspecto no fuese el de una impresión 3D, es decir, plástico. Por ello se decidió que el modelo apoyase el contexto científico con el aspecto de un fósil lo más cercano a la realidad, a pesar de que se supiese que no lo era. De este modo, la autora de presente tesis doctoral tenía como objetivo conseguir que el modelo consiguiese una apariencia más natural.

Dos fueron los motivos que hicieron descartar la realización de un molde y posterior vaciado: por un lado, la propia morfología de la pieza, que cuenta con elementos muy alargados y muy delgados, lo que complica la realización del molde; por otro lado, el hecho de que el modelo no iba a ser expuesto en un museo hace que los detalles del color no deban ser tan precisos como cuando van a ser expuestos. Por ello, puesto que como ya ha sido indicado, en este caso el modelo iba a mostrarse con el fin de apoyar el discurso y la investigación llevados a cabo por el Doctor Bastir, se decidió patinar directamente la impresión 3D, descartándose el proceso de moldeo llevado a cabo en el cráneo de *H. Naledi* (estudio de caso anterior), lo que además reducía los tiempos de trabajo y los materiales necesarios considerablemente.

El modelo había sido impreso en 4 partes, por lo que lógicamente debían unirse para configurar una única pieza. Sin embargo, antes de unir las 4 piezas, se limpió cada una de ellas para eliminar los soportes que la impresora generó durante el proceso de impresión.



Fig. 342 Pieza impresa en 4 cuartos y desmontada. Dada la morfología de las piezas, esta se separaba en más piezas cuando los soportes que sujetaban las costillas se iban eliminando. Las costillas quedarían de nuevo unidas cuando se adhiriesen a su prolongación, correspondiente a otro de los cuartos impresos. ©María Ávila Rodríguez.



Fig. 343 Detalle de los soportes de impresión en unas de las piezas impresas. ©María Ávila Rodríguez.



Fig. 344 Uno de los cuartos de la pieza impreso, visto desde delante y desde la parte de atrás. ©María Ávila Rodríguez.

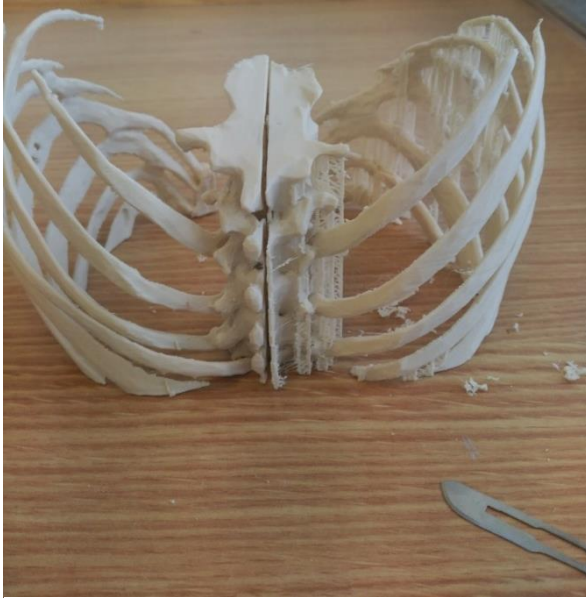


Fig. 345 En la imagen puede verse dos de las partes que conformarían el modelo impresas. A la situada a la izquierda ya se le habían eliminado los soportes de impresión con el bisturí (abajo a la derecha), mientras que la de la derecha aún los tenía. ©María Ávila Rodríguez.



Fig. 346 A la izquierda se muestra una de las piezas antes de que los soportes fuesen eliminados, mientras que a la derecha aparece la pieza libre de soportes. Como puede verse en la imagen de la derecha, la última pieza, el fragmento de costilla, quedó suelto al eliminarse los soportes. Este fragmento debió unirse posteriormente por ambos lados y quedaría así integrado en el modelo completo. ©María Ávila Rodríguez.

Una vez limpias de soportes, las piezas fueron unidas hasta completar el modelo. Para ello se probaron diferentes adhesivos: 1. Pegamento de plásticos rígidos marca Ceys; 2. Adhesivo de fórmula extra fuerte de la marca Loctite; y 3. Pegamento de contacto marca Pattex.



Fig. 347 Ejemplo de dos de las piezas que debían unirse, ya liberadas de los soportes.

El proceso de unir las piezas fue lento y en ocasiones complejo. El primer adhesivo citado era demasiado lento, por lo que había que mantener las piezas a unir en la misma posición con el fin de conseguir el resultado adecuado, algo que en el caso de las superficies grandes no fue complicado. Sin embargo, cuando las superficies que debían adherirse eran pequeñas, surgieron problemas, puesto que las piezas no se mantenían en la posición en la que debían adherirse al resbalar por las propias características del material plástico que es satinado. Se probó por tanto a aplicar bicarbonato en el adhesivo con el fin de conseguir una superficie más rugosa, lo que facilitaría el contacto y la unión entre ambas piezas. Desafortunadamente los resultados continuaron siendo lentos, el procedimiento difícil de llevar a cabo y no se consiguió adherir correctamente las piezas. Además, al tratarse de superficies tan pequeñas, al añadir la mezcla con bicarbonato, las piezas dejaban de encajar puesto que su superficie de unión cambiaba y el proceso se volvía aún más complejo. Por otro lado, los otros adhesivos no tenían el suficiente poder adhesivo por lo que finalmente, combinando unos y otros, se consiguió unir todas las piezas. En ocasiones se emplearon pinzas que sostuviesen las piezas hasta que el pegamento curase.

Por su parte, para conseguir una buena unión entre la parte superior e inferior, se colocó a modo de espiga un trozo de plástico aprovechando el hueco presente en el centro de la columna vertebral de la pieza, con el fin de aportar una mayor fijación y sujeción a la pieza.



Fig. 348 Uniendo las piezas con pinzas para que el adhesivo secase sin que estas se moviesen de la posición correcta. ©María Ávila Rodríguez.

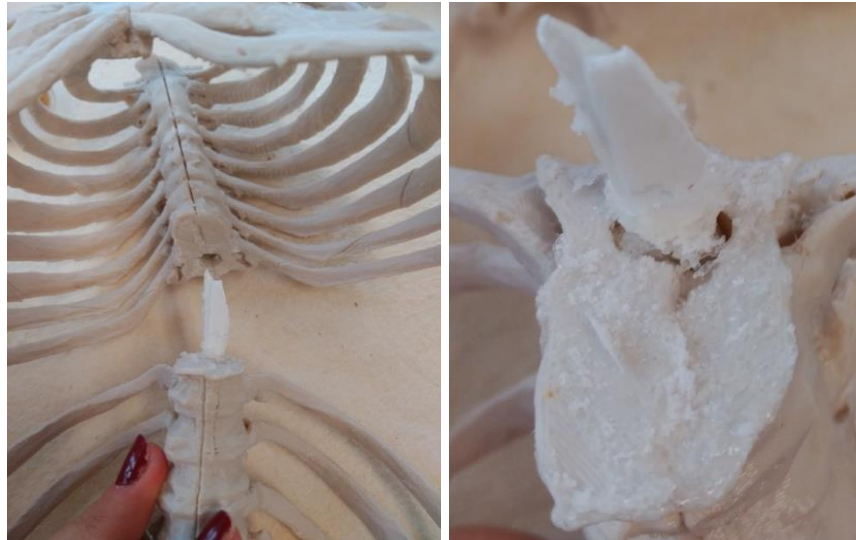


Fig. 349 Espiga empleada para la unión de las partes superior e inferior. A la derecha puede verse en detalle la rugosidad aportada por la mezcla del adhesivo y el bicarbonato, en una búsqueda de facilitar la unión entre ambos. ©María Ávila Rodríguez.

Cuando todas las piezas habían sido unidas, las juntas de la misma debían rellenarse puesto que había saltos y huecos entre pieza y pieza. Para rellenarlas se decidió emplear resina epoxídica, la misma empleada en el vaciado del cráneo de *H. Naledi*. De este modo se preparó una pequeña cantidad de la mezcla de resina y bentone como espesante y se fue aplicando con ayuda de espátulines, tapando al máximo posible los huecos existentes.

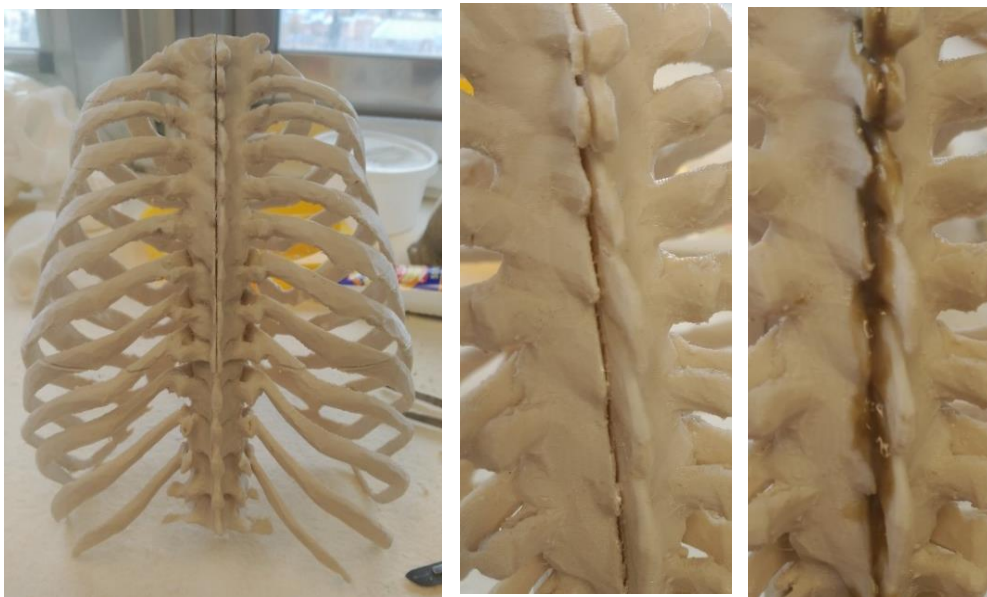


Fig. 350 A la izquierda aparece la pieza ya completamente montada. Mientras que las dos imágenes de la derecha hacen referencia al detalle de una de las juntas, antes de que fuese aplicada la resina que taparía los huecos, y la misma zona, ya con la resina aplicada, a su derecha. ©María Ávila Rodríguez.



Una vez todos éstos habían sido debidamente rellenados por la resina, se esperó 24h, tiempo de curado que el fabricante indicaba para el completo curado de la resina. Cuando esta había endurecido por completo, se retiraron los excesos de la misma, combinando la acción de un bisturí para eliminar los residuos de menor tamaño junto un microtorno, con el que se eliminaron aquellos de mayor tamaño.

Fig. 351 En la mitad superior del modelo las juntas habían sido ya retocadas mientras que en la mitad inferior aún puede verse el exceso de resina. ©María Ávila Rodríguez.



Fig. 352 Aplicando el pigmento sobre la pieza con el pincel. ©María Ávila Rodríguez.

Con el modelo completo pudo procederse aplicar la pátina que le aportaría un aspectode fósil. Para ello se realizó una mezcla de barníz mate con pigmentos, y se aplicó, directamente sobre el modelo con un pincel, buscando los tonos que configurasen el aspecto deseado.

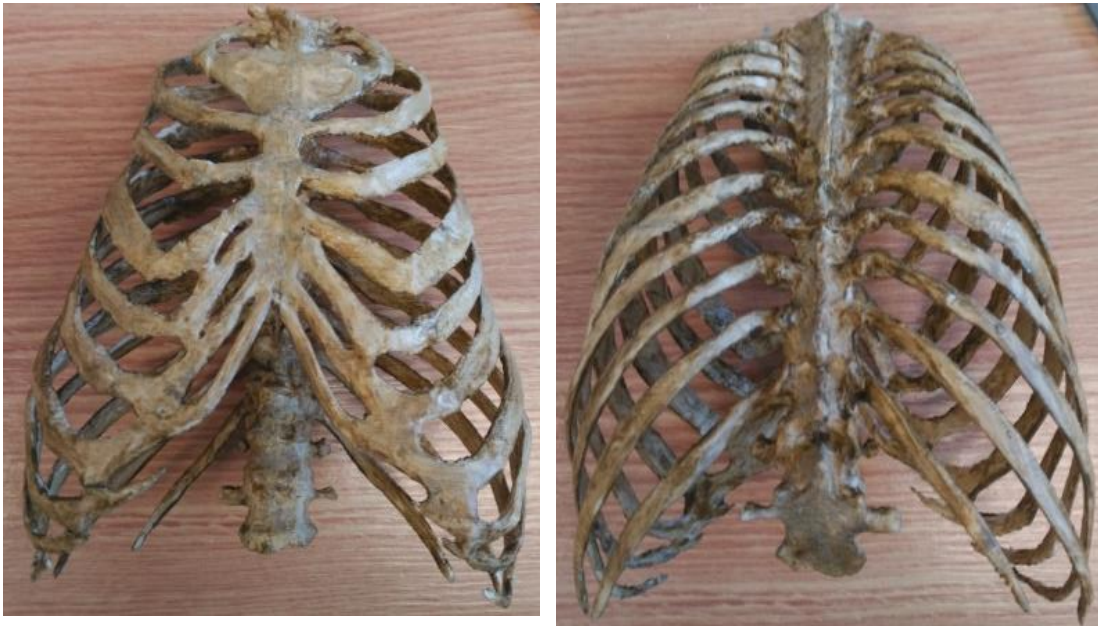


Fig. 353 Resultado final de la pieza visto desde la parte frontal y desde la parte trasera. ©María Ávila Rodríguez.

De este modo, el Doctor Bastir pudo acudir a la conferencia con el modelo, tal y como deseaba, y este realmente fue valorado por los asistentes.



Fig. 354 Doctor Markus Bastir en Nueva Orleans, posando junto al póster que presentó en la conferencia y portando en las manos el tórax objeto de estudio. ©Markus Bastir.

9. 1. 3 Las columnas vertebrales

Alberto Riesco López (2017), citado anteriormente, explica en su TFM cómo el estudio de la columna vertebral en homínidos resulta muy interesante por tener una implicación directa en el paso de un sistema de locomoción cuadrúpedo al bipedismo. Así, tratar de conocer la forma y articulación de las columnas de otras especies cercanas a la del ser humano es fundamental para incrementar el grado de conocimiento que se tiene acerca de la biología de otras especies cercanas a los humanos actuales. En concreto, la región torácica es especialmente relevante, puesto que constituye una zona intermedia que sirve como punto de inserción de las costillas, estructuras claves en la respiración del individuo. El objetivo de la investigación de Riesco López era, por tanto, desarrollar una metodología de reconstrucción de columnas torácicas de especies fósiles, puesto que generalmente éstas se hallan desarticuladas y dispersas sin puntos de referencia para posicionarlas, además de deformadas por los procesos de fosilización, centrando la atención de su estudio en el conjunto de fósiles KNM-WT 15000, columna vertebral del denominado niño de Nariokotome. El ejemplar conocido como KNM-WT 15000 (Kenya National Museums; West Turkana) pertenece a la especie *Homo Erectus* y fue descubierto en 1984 en Nariokotome, de ahí su nombre popular, niño de Nariokotome, al oeste del Lago Turkana, en Kenia. De este espécimen

solo faltan unas costillas, las 6 primeras vértebras cervicales y dos vértebras torácicas, así como ambos radios y la mayoría de los huesos de la mano y el pie. Por ello, es considerado el homínido temprano más completo que se conoce, siendo únicamente comparable el recientemente descubierto *H. Naledi*, citado anteriormente. Estos restos fueron atribuidos a

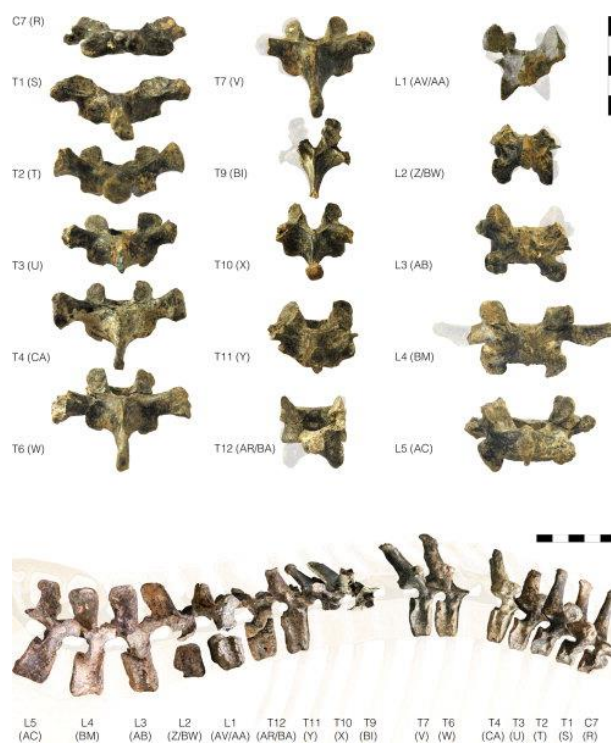


Fig. 355 Vértebras presacrales en vista dorsal (arriba) y sagital (debajo) de KNM-WT 15000. Las vértebras T5 y T8 están ausentes y las piezas perdidas reconstruidas a partir de imágenes espejo aparecen semitransparentes. ©Regula Schiess & Martin Haeusler.

un individuo juvenil cuyo desarrollo esquelético es comparable al de un humano moderno de entre 11 y 15 años. Con respecto al estudio de la columna vertebral del niño de Nariokotome, un total de 10 vértebras forman el esqueleto siendo por tanto una muestra crucial, ya que representa la práctica totalidad de la región torácica de esta especie, permitiendo con su estudio aumentar el conocimiento de la biología de *Homo Erectus*. En KNM-WT 15000 han sido diagnosticadas distintas patologías y con respecto al estudio de la estatura, se plantean varias posibilidades: si bien el estudio de la estatura realizado a partir del análisis de los huesos largos da una altura de 160 cm, estimaciones más actuales empleando el tronco como punto de referencia establecen una estatura al morir de 141 cm o de 147, resultados obtenidos por el uso de dos métodos distintos en el mismo trabajo. Se observa de este modo que diferentes estimaciones en función de la columna vertebral dan lugar a estaturas diversas y se evidencia una vez más la necesidad de desarrollar un buen método para reconstruir la columna vertebral a la hora de realizar estimaciones acerca de la altura total del individuo.

La primera fase del trabajo consistió por tanto en la validación de una serie de métodos desarrollados de reconstrucción de columnas (físicos y virtuales) a partir de sus vértebras, utilizando como modelos dos columnas de humanos modernos. De este modo, se conformaría la base de trabajo de cara a futuros proyectos que permitirían realizar estudios de anatomía comparada entre columnas de diferentes especies de homínidos o reconstrucciones de una región corporal mayor. Para alcanzar este objetivo era necesario cuantificar el sesgo de información obtenido al realizar la reconstrucción de columnas vertebrales torácicas mediante técnicas virtuales y físicas. El análisis de los resultados obtenidos permitiría determinar cuál era el mejor método de reconstrucción. Una vez establecido el mejor método de reconstrucción de columnas torácicas, se aplicaría a la reconstrucción de la columna vertebral del niño de Nariokotome, de la que se desconoce su conexión anatómica. El objetivo era poder comparar las diferentes reconstrucciones realizadas tanto virtualmente como físicamente, por lo que interesaba obtener tanto la columna torácica original del individuo, como cada una de sus 12 vértebras torácicas de manera aislada.

Puesto que cada una de las vertebras que forman las columnas fueron impresas por separado y dado que no se contaba con conocimiento alguno sobre este ámbito, la autora de

la presente tesis vio favorable realizar algunas indagaciones referentes a las columnas vertebrales humanas con el fin de comprender las reconstrucciones que iba a desarrollar.

Así, a modo de resumen debe esclarecerse que la columna vertebral presenta curvaturas que aportan flexibilidad y se encargan de distribuir o desviar las cargas que deben soportar las vértebras y los discos intervertebrales con el fin de evitar que las más inferiores soporten demasiado peso. Las curvaturas normales son la cervical de concavidad posterior, la torácica de concavidad anterior, la lumbar de concavidad posterior y la pélvica de concavidad anterior. La torácica y la pélvica

constituyen curvaturas primarias puesto que tienen la misma orientación que la curvatura fetal; la cervical y la lumbar, por el contrario, son curvaturas secundarias o compensadoras y se forman después del nacimiento (Anatolandia, 2013).

Sin embargo, ha de subrayarse que Riesco López supervisó todas las tareas de reconstrucción, puesto conoce a la perfección la posición de cada una de las vértebras. De hecho, se encargó de escribir una abreviatura en cada una de ellas a fin de indicar en primer lugar el tipo de vértebra que era, seguido de su posición numérica y por último, el espécimen al que pertenecía.

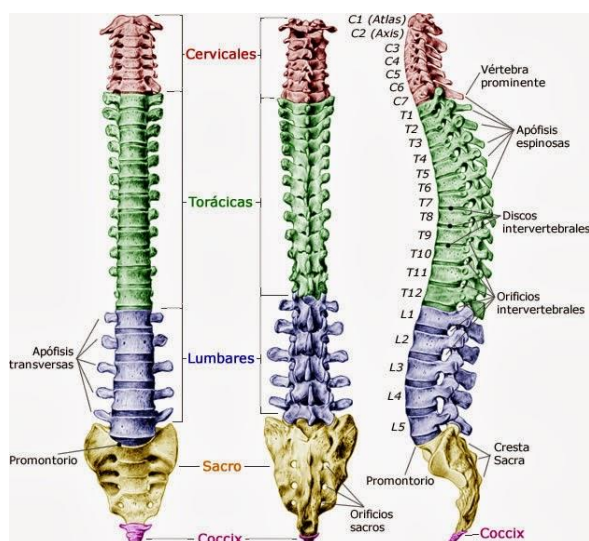


Fig. 356 Análisis de la columna vertebral humana. ©Anatolandia.

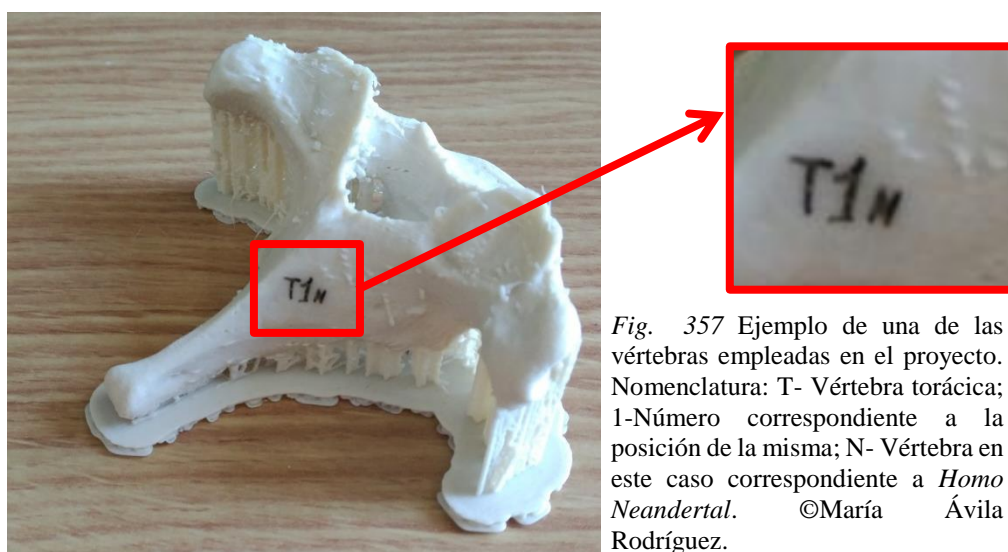


Fig. 357 Ejemplo de una de las vértebras empleadas en el proyecto. Nomenclatura: T- Vértebra torácica; 1-Número correspondiente a la posición de la misma; N- Vértebra en este caso correspondiente a *Homo Neandertal*. ©María Ávila Rodríguez.

Del mismo modo que en el caso anterior de las costillas, las vértebras en un principio tenían sus soportes de impresión aún unidos a la pieza, por lo que en primer lugar se procedió a eliminarlos mecánicamente con la ayuda de alicates y retocando los posibles restos a punta de bisturí.



Fig. 358 En la imagen de la izquierda pueden verse todas las vértebras empleadas en el proyecto. En las imágenes de la derecha, una de ellas fue escogida como ejemplo para mostrar su morfología y soportes. ©María Ávila Rodríguez.



Fig. 359 Eliminación de los soportes de una de las vértebras con ayuda de una tenacilla. ©María Ávila Rodríguez.

Cuando todas las vértebras estuvieron limpias de soportes, se separaron por espécimen, puesto que estos estaban mezclados, y entonces pudo comenzarse con las tareas de montaje de las columnas vertebrales.



Fig. 360 Vértebras limpias de los soportes de impresión. ©María Ávila Rodríguez.

9. 1. 3. 1 Columnas de dos individuos actuales y la del niño de Narikotome

Las columnas nº 1 y nº2 corresponden a dos individuos actuales, es decir al *Homo Sapiens*, concretamente del continente Africano y Europeo respectivamente, con el fin de detectar si se observan diferencias debidas a la procedencia de los individuos dado el efecto del clima.

El nº1 sufre la patología de escoliosis y el nº2 corresponde a un individuo sano. Se escogió un individuo con escoliosis no sólo por la posibilidad de que el niño de Narikotome sufriese dicha patología, si no también debido a que la presencia de patologías que modifiquen las columnas vertebrales debe ser tenida en cuenta a la hora de estudiar la morfología de la columna vertebral. Una de las más conocidas es la escoliosis, la cual se produce como efecto de una desviación de la curvatura de la columna en las tres dimensiones, afectando tanto a las vértebras como a los discos intervertebrales y dando

origen a un aumento de la deformación del cuerpo vertebral a medida que la patología progresa. La escoliosis se mide mediante el método Cobb según el cual si la desviación es menor de 10° la columna se encuentra libre de escoliosis. Si la desviación se encuentra entre los 10° y los 20° se trata de una escoliosis media y si supera los 20° se considera una escoliosis patológica (Been et al. 2017; Scherrer et al., 2013, citado en Riesco, 2017, p.6).

Ambos conjuntos (nº1 y nº2), cuentan con las 12 vértebras torácicas, puesto que se trataba de individuos actuales, pacientes vivos cuya columna vertebral fueron escaneadas mediante CT-Scan, es decir,



Fig. 365 Sección del CT-Scan del individuo europeo, en el cual se ha marcado en color verde el tejido óseo al seleccionar el valor del umbral de densidad correspondiente. ©Alberto Riesco López.

Tomografía Computarizada. Este método, empleado principalmente en medicina, es una tecnología para diagnóstico con imágenes. Con ella, se obtienen las diferentes secciones de un objeto determinado mediante el uso de rayos X a lo largo de toda su superficie. Actualmente, el conjunto de imágenes obtenidas puede ser unido gracias a determinados programas que permiten visualizar en 3D tanto el objeto al completo como únicamente aquellas zonas que puedan resultar de mayor interés. Para ello se utiliza el método conocido como segmentación, sistema que Riesco López empleó es esta primera fase de trabajo. Para ello empleó el Software Mimics 10.0 en un proceso que, para facilitar la comprensión del lector, podía compararse con la fotogrametría tan revisada a lo largo de la tesis, puesto que se emplean las numerosas radiografías obtenidas en la Tomografía Computarizada para generar el modelo 3D, en lugar de trabajar con fotografías como ocurre con la fotogrametría.

El programa posibilita seleccionar entre diferentes umbrales de densidad, distinguidos en el objeto como resultado la intensidad de la radiación debido a su interacción con la materia encontrada. Dado que el objeto de estudio eran, en este caso, las vértebras torácicas, se seleccionó el valor del umbral de densidad correspondiente al tejido óseo con el fin de obtener la columna torácica de cada individuo, tal como se encontraba en el momento en el que se realizó el escáner.

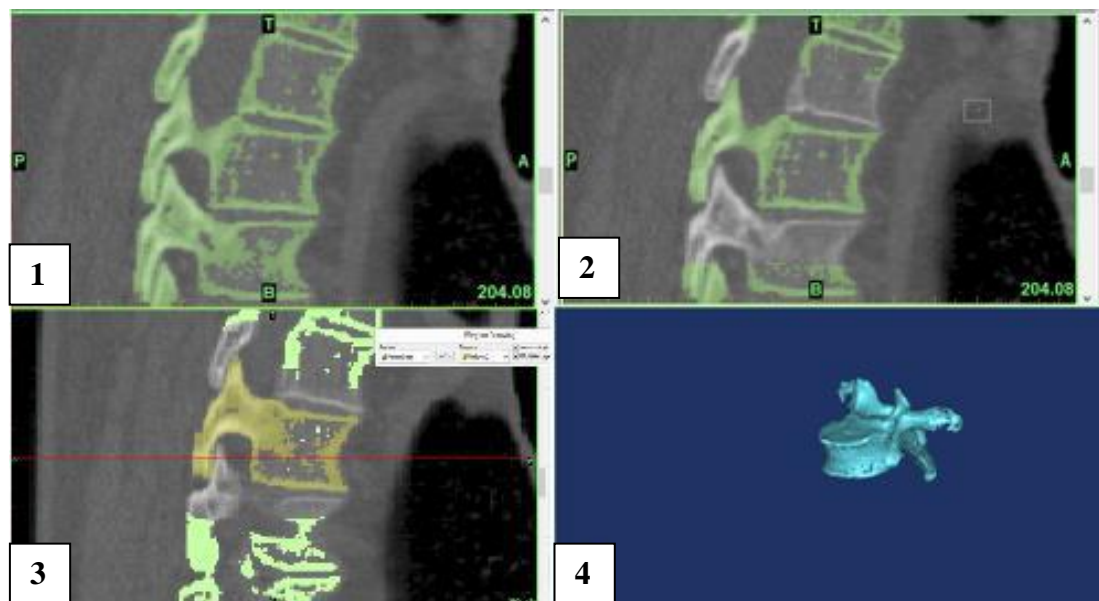


Fig. 366 Segmentación de una vértebra torácica con respecto al resto en el individuo europeo: 1) imagen con parte de la columna marcada; 2) imagen en la que se ha realizado el borrado de las regiones de tejido óseo que se encontraban en contacto directo con la vértebra que se pretende aislar; 3) diferenciación de la vértebra de interés con respecto al resto del tejido óseo; 4) creación de la imagen tridimensional de la vértebra diferenciada. ©Alberto Riesco López.

Así, para llevar a cabo las posteriores reconstrucciones se fueron aislando cada una de las vértebras torácicas, eliminando los elementos colindantes de igual densidad que la vértebra que se segmenta en cada momento. Este proceso se llevó a cabo con las 12 vértebras torácicas que conformaban cada una de las columnas de ambos individuos.

Una vez se obtuvieron por un lado el modelo 3D de las 2 columnas torácicas y las 24 vértebras torácicas por otro (12 por individuo), se aplicaron cuatro métodos de reconstrucción. Disponer de la forma original de ambas columnas permitía poder compararlas con todos los métodos de reconstrucción, y una vez escogido el más riguroso, este podría ser empleado para realizar la reconstrucción de la columna torácica del niño de Nariokotome. Las metodologías empleadas fueron las siguientes:

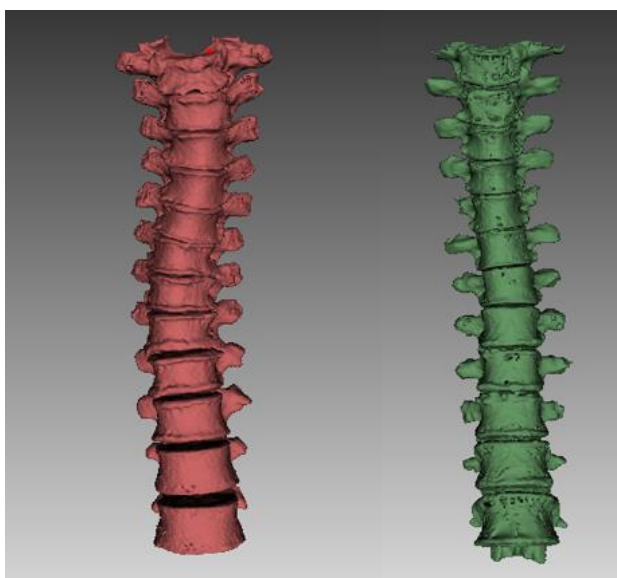


Fig. 367 Resultado de la segmentación de las columnas torácicas originales. En rojo la columna de humano actual de origen africano, y en verde la de origen europeo. ©Alberto Riesco López.

1. Reconstrucción virtual en base a las facetas articulares¹³¹ (M1): se trató que las facetas articulares inferiores de una vértebra tuviesen el máximo solapamiento posible con las facetas articulares superiores de la vértebra siguiente. Para ello se empleó el software Artec Studio.
2. Reconstrucción virtual mediante el método ONP (M2): este método se basa, al igual que el método anterior, en el máximo solapamiento posible entre las facetas de vértebras contiguas, buscando además el máximo paralelismo entre las caras de los cuerpos vertebrales adyacentes. Para cada columna este proceso fue realizado dos veces, comenzando desde la vértebra torácica número 1 y en sentido descendente (M2a) y, al contrario, comenzando por la vértebra torácica número 12 y en sentido ascendente (M2b). De este modo es posible comprobar la validez del método.

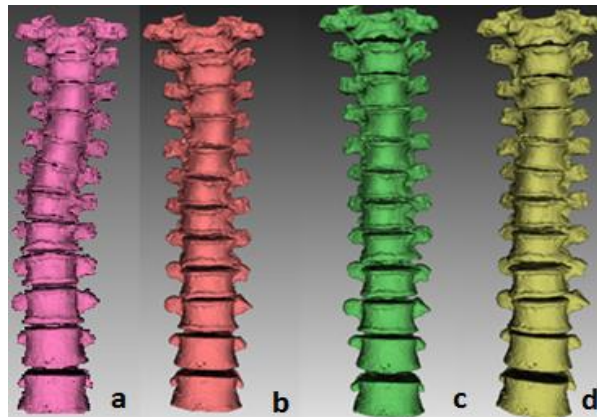


Fig. 368 Reconstrucciones virtuales del individuo africano: a) columna original. b) reconstrucción virtual mediante el método ONP, comenzando por la vértebra torácica número 12 y continuando en sentido ascendente (M2b); c) reconstrucción virtual mediante el método ONP, comenzando desde la vértebra torácica número 1 y en sentido descendente (M2a); d) reconstrucción virtual en base a las facetas articulares (M1). ©Alberto Riesco López.

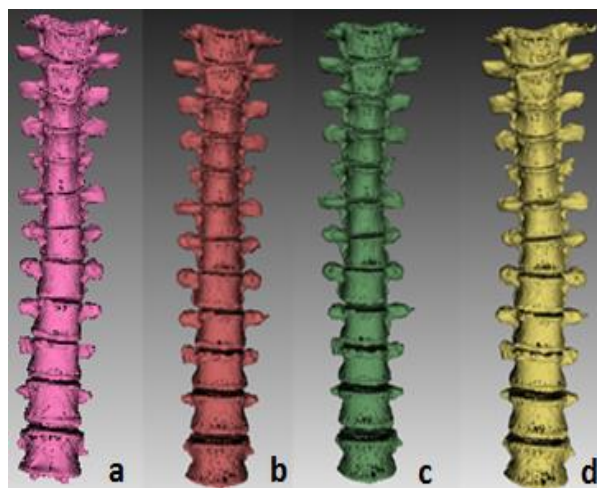


Fig. 369 Reconstrucciones virtuales del individuo europeo: a) columna original. b) reconstrucción virtual mediante el método ONP, comenzando por la vértebra torácica número 12 y continuando en sentido ascendente (M2b); c) reconstrucción virtual mediante el método ONP, comenzando desde la vértebra torácica número 1 y en sentido descendente (M2a); d) reconstrucción virtual en base a las facetas articulares (M1). ©Alberto Riesco López.

¹³¹ Pequeña superficie plana de un hueso en el punto donde se articula con otra estructura (Clínica Universidad Navarra, s.f.).

3. Reconstrucción física en base a las facetas articulares (M3): este método es equivalente a M1, con la diferencia de que M3 se realizó en un modelo tridimensional físico impreso con la ayuda de las impresoras 3D Delta WASP 40/70 y el Makerbot R2 del Laboratorio de Morfología Virtual del MNCN. Cada vértebra fue impresa de manera individual y la reconstrucción se realizó uniéndolas solamente las facetas articulares de vértebras contiguas con el máximo solapamiento posible.

Antes de adherir una vértebra con su colindante, se comprobó que encajasen correctamente puesto que, con frecuencia, la impresora genera rebabas que por el reducido tamaño de las piezas, afectan en sus uniones. De este modo, si se comprobaba que no encajaban como era debido, con ayuda de un microtorno, se eliminaban los restos de soportes y posibles defectos de impresión.

Para unir vértebra con vértebra se aplicó en el interior de las uniones la cantidad suficiente y precisa de adhesivo termofusible que había sido previamente calentado hasta su fundición por una pistola. De este modo, cuando se apretaba el gatillo de la pistola, esta expulsaba el adhesivo fundido, y al enfriarse se endurecía y adhería las dos superficies.

Fig. 370 En la imagen superior se comprueba el encaje de las piezas de la columna del africano contemporáneo, mientras que en la imagen inferior se retocan con microtorno para que encajasen correctamente. ©María Ávila Rodríguez.



Para facilitar el trabajo de las uniones, se adhirieron primero la mitad de las vértebras por un lado y después las otras. De este modo, las fuerzas se repartían a lo largo de la columna y era más fácil manejar y adherir las vértebras. Una vez se tuvieron ambas mitades reconstruidas, se unieron entre sí, completando el conjunto.



Fig. 371 A la izquierda aplicando el adhesivo con la pistola para unir así las vértebras. A la derecha la columna del individuo europeo dividida en dos antes de ser unida. ©María Ávila Rodríguez.

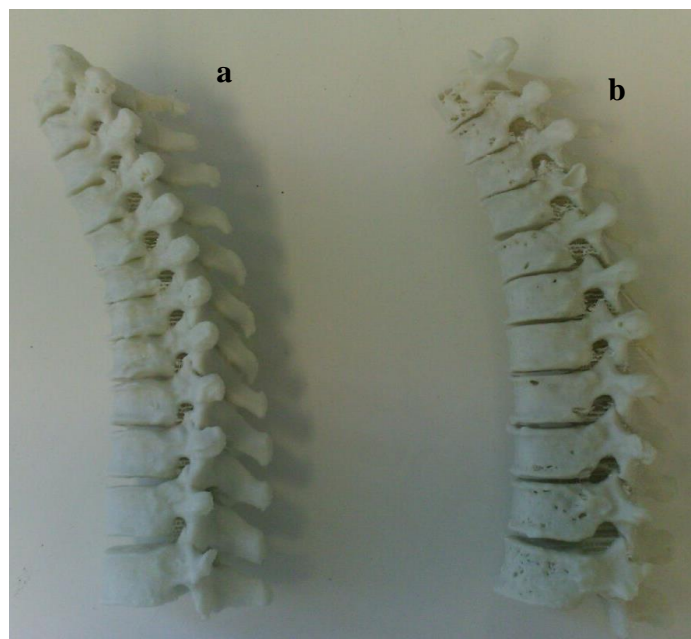


Fig. 372 Método M3: a) reconstrucción de la columna torácica del individuo africano. b) reconstrucción de la columna torácica del individuo europeo. ©Alberto Riesco López.

4. Reconstrucción física en base a los cuerpos vertebrales (M4): este método, al igual que el M3, se realiza empleando modelos físicos tridimensionales. En este caso, la reconstrucción de la columna se realizó uniendo los cuerpos vertebrales de vértebras consecutivas y debía encontrarse el modo de imitar los discos intervertebrales¹³² de la columna, llenando el espacio completo entre vértebras. El grosor de estos “discos” se ajustó tomando como referencia el solapamiento de las facetas articulares.

Riesco López (2017) había probado la unión de las vértebras colocando plastilina entre cada una de ellas con el fin de simular los discos intervertebrales. Sin embargo, como los resultados obtenidos distaron notablemente de los objetivos que se deseaban alcanzar, la autora de la presente tesis doctoral decidió experimentar probando el propio adhesivo fundido para realizar los discos que unen las vértebras. Éste al ser aplicado en gran cantidad, seca en un tono semitransparente y conserva cierta flexibilidad, cualidades inherentes a los discos intervertebrales, con lo que se consideró se trataba de una solución válida para el objetivo propuesto.



Fig. 733 Método M4: a) reconstrucción de la columna torácica del individuo europeo. b) reconstrucción de la columna torácica del individuo africano. ©Alberto Riesco López.

¹³² Estos se sitúan entre las vértebras cervicales, dorsales y lumbares y funcionan como amortiguador. Cada uno de ellos está compuesto por dos partes: la parte central de consistencia gelatinosa que se denomina "núcleo pulposo" y una envuelta fibrosa que lo mantiene en su lugar y se denomina "anillo o envuelta fibrosa" (Espalda, 2016).



Fig. 374 Aplicando el adhesivo entre las vértebras con el fin de simular los discos.
©María Ávila Rodríguez.

Una vez realizadas las diferentes reconstrucciones, debían virtualizarse aquellas que fueron reconstruidas físicamente con el fin de poder realizar los posteriores análisis estadísticos. Para ello, estas fueron escaneadas con luz blanca empleando el escáner Artec MHT y el Artec Spider y se postprocesaron los datos en Artec Studio y Geomagic.

Con las columnas virtualizadas, Riesco López (2017), empleando la morfometría geométrica¹³³ y un PCA¹³⁴ (Análisis de Componentes Principales), realizó un estudio de la forma, con el cual obtuvo las distancias Procrustes¹³⁵ que hay entre las diferentes reconstrucciones con respecto a las columnas originales.

¹³³ En este estudio Riesco empleó 9 *landmarks* por vértebra, lo cual en una columna torácica que está formada por 12 vértebras da un total de 108 *landmarks*, colocados con la ayuda del programa *Viewbox 4*. Se señalaron estos *landmarks* en cada una de las reconstrucciones realizadas, así como en las columnas originales (Riesco, 2017, pp.20 y 21)

¹³⁴ Uno de los análisis estadísticos más empleados en distintos campos de la Paleontología es el conocido como PCA (Análisis de Componentes Principales), que permite simplificar las descripciones de variación entre individuos y hacerlas más fácil de interpretar originales (Riesco, 2017, p.23)

¹³⁵ Las distancias Procrustes expresan la magnitud de separación entre hitos anatómicos que han sido previamente alineados con respecto a un punto medio al que convergen todos los demás hitos de una misma estructura de interés. Posteriormente, la matriz de estas distancias es transformada en una matriz de coeficientes de similitud (Rothhammer y Llop, 2004, p.96).

Pudo entonces considerarse que los métodos menos erróneos era M1, M2b y M3, es decir: la reconstrucción virtual en base a las facetas articulares, la virtual mediante el método ONP, comenzando por la vértebra torácica número 12 y continuando en sentido ascendente y la física en base a las facetas, respectivamente.

	Africano (original)		Europeo (original)
Físico (Facetas)	0.066294325	Virtual (Facetas)	0.046756184
Virtual (Facetas)	0.07016197	ONP (ascendente)	0.061387041
ONP (ascendente)	0.082665298	Físico (Facetas)	0.067546862
ONP (descendente)	0.090623019	ONP (descendente)	0.071324261
Físico (Cuerpo)	0.101862318	Físico (Cuerpo)	0.14637579

Tabla 4 Distancias procrustes de cada una de las 5 reconstrucciones realizadas en cada individuo con respecto a la columna original. ©Alberto Riesco López.

Una vez se conocían las metodologías más fiables a la hora de reconstruir columnas torácicas, se procedió a reconstruir la columna torácica del niño de Nariokotome. Estas vértebras fueron virtualizadas por Fred Spoor y Emma Mbua con un micro-CT, e hicieron llegar estos datos virtuales al Laboratorio de Morfología Virtual del Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid.

La vértebra torácica V está ausente, por lo que se utilizó una vértebra creada de manera virtual surgida como la forma media entre las vértebras torácicas IV y VI. Sin embargo, esta metodología no pudo llevarse a cabo en las vertebrae VIII, IX y la XII, también ausentes, puesto que en las dos primeras mencionadas se trataba de huecos de mayor tamaño y la última citada constituía la última de la serie. Para solucionar por tanto los vacíos se emplearon las vértebras torácicas pertenecientes a un humano actual de entre 8 y 9 años, cuyas vértebras son equivalentes en tamaño a las del objeto de estudio. Esas vértebras fueron obtenidas de nuevo mediante un CT-Scan.

Por su parte, la vértebra X, a pesar de la ausencia de su cuerpo vertebral, se empleó para la reconstrucción de la columna, ya que se conservaban perfectamente las facetas articulares. En la reconstrucción física no se rellenó este espacio puesto que era demasiado grande para cubrirlo con el pegamento empleado en el resto de espacios intervertebrales y la forma de la columna original quedaría alterada.

A pesar de que el primer análisis permitió conocer el método más óptimo de reconstrucción de columnas, Riesco López (2017) decidió volver a emplear los diferentes sistemas enumerados anteriormente, añadiendo dos nuevas metodologías:

- 1- Reconstrucción física en base a las facetas articulares y cuerpos vertebrales (M5): similar a la reconstrucción física en base a facetas descrita previamente, rellenando en este caso también el espacio entre los cuerpos vertebrales con el adhesivo empleado para unirlos, simulando la presencia de discos intervertebrales.

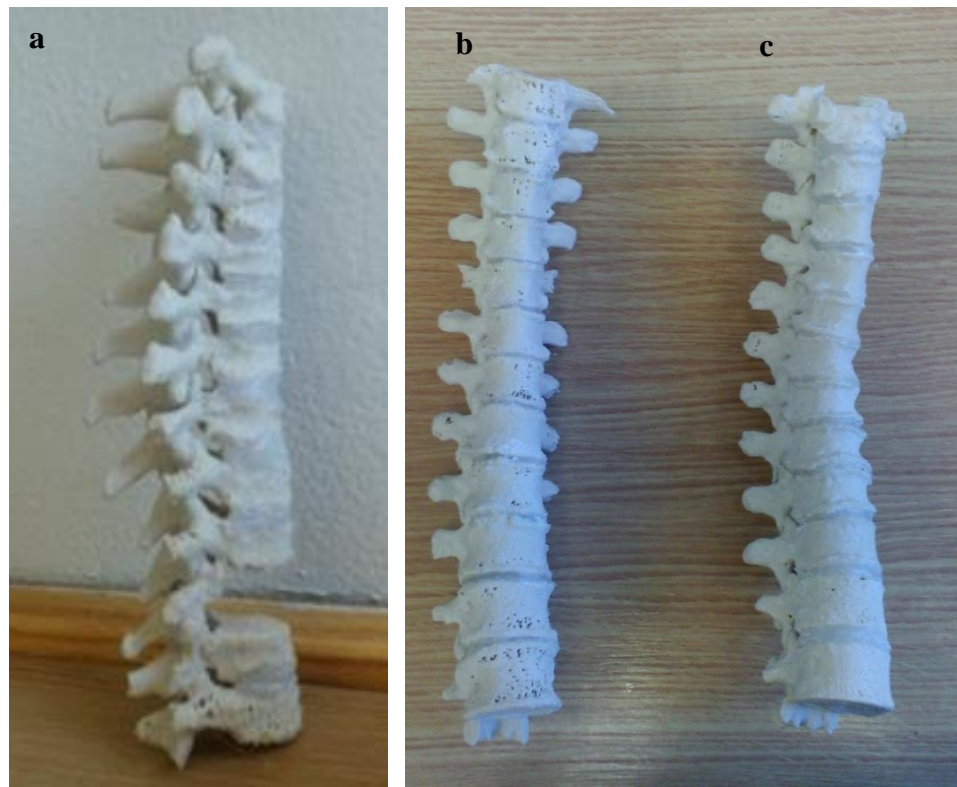


Fig. 375 Método M5, empleando adhesivo en los espacios intervertebrales a modo de discos intervertebrales: a) reconstrucción de la columna del niño de Nariokotome, señalando en sentido descendente las vértebras VIII, IX y XII, pertenecientes a un juvenil actual; b) reconstrucción de la columna del individuo actual europeo y c) reconstrucción de la columna del individuo actual africano. ©Alberto Riesco López.

- 2- Reconstrucción virtual mixta (M6): se basa en las facetas articulares siempre que sea posible, empleando el método ONP en las zonas de transición entre vértebras del fósil y del humano actual, para reducir el espacio entre vértebras generado por las diferencias en la forma entre las vértebras de las dos especies.

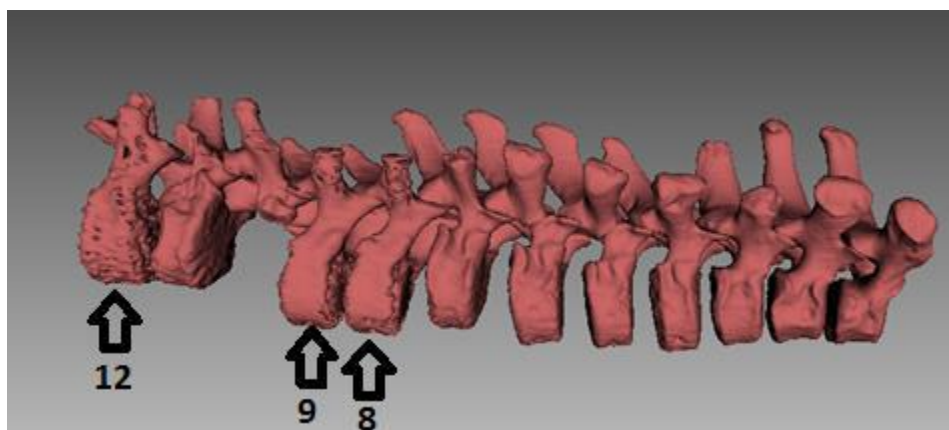


Fig. 3 Columna torácica del niño de Nariokotome reconstruida virtualmente (M6). Las vértebras 8, 9 y 12 pertenecen a un humano actual juvenil. ©Alberto Riesco López.

De este modo, se obtuvieron un total de 16 columnas, realizando de nuevo un estudio de morfometría geométrica y otro PCA con el que se pueden obtener conclusiones acerca de las formas obtenidas con las diferentes reconstrucciones realizadas.

Africano (original)		Europeo (original)		Nariokotome (Físico: Facetas y cuerpo)	
Físico (Facetas)	0.06630171	Virtual (Facetas)	0.046738942	Virtual	0.09395029
Virtual (Facetas)	0.07015159	Físico (Facetas y cuerpo)	0.060145969		
ONP (ascendente)	0.08267619	ONP (ascendente)	0.061385219		
ONP (descendente)	0.090630851	Físico (Facetas)	0.06760377		
Físico (Cuerpo)	0.10186846	ONP (descendente)	0.071335615		
Físico (Facetas y cuerpo)	0.1110883	Físico (Cuerpo)	0.146380472		
	Físico (Facetas y cuerpo)		Físico (Facetas y cuerpo)		
ONP (ascendente)	0.08150427	Pegamento	0.051245679		
ONP (descendente)	0.088564038	Virtual (Facetas)	0.05246861		
Virtual (Facetas)	0.10747874	ONP (ascendente)	0.05384435		
Físico (Facetas)	0.12423925	ONP (descendente)	0.06358034		

Tabla 5. Lista de distancias procrustes de distintas reconstrucciones realizadas en cada individuo con respecto a la columna original y con respecto al método M5. Por último, la distancia procrustes entre ambas reconstrucciones del niño de Nariokotome. ©Alberto Riesco López.

Como conclusiones, Riesco López (2017) pudo comprobar que la estructura de la columna torácica queda bien cuantificada generalmente por los *landmarks* elegidos. Por otra parte, no se pudieron observar diferencias debidas al sexo, puesto que tanto los dos individuos actuales KNM-WT 15000 pertenecían al género masculino. Tampoco se hallaron diferencias que se puedan relacionar directamente con la región en la que viven o vivieron, por lo que no se pudieron estudiar posibles adaptaciones al clima. Sin embargo, en la tabla de distancias procrustes se observaron, por lo general, menores distancias en las reconstrucciones de la columna del europeo que en las del africano por tratarse ésta de una columna patológica. Empleando el método Cobb, mencionado anteriormente, se estableció que el individuo padecía una escoliosis media. La columna torácica del individuo europeo, sin embargo, no poseía ningún tipo de patología identificable. Esta diferencia, por lo tanto,

podría explicar las dispersiones tan dispares en las reconstrucciones de ambos individuos, siendo más cercanas a la forma de la columna original aquellas reconstrucciones realizadas a partir de las vértebras torácicas de individuos sin patologías.

Por otra parte, dadas las distancias procrustes, los métodos que dieron mejor resultado con respecto a las columnas originales fueron aquellos que emplearon como referencia las facetas articulares (M1 y M3) y se obtuvieron los peores resultados en aquellos realizados en base a los cuerpos vertebrales (M4). Por tanto, a la hora de reconstruir una columna vertebral de la cual no se conoce su forma original, la mejor referencia son las facetas, tanto en columnas con escoliosis como en columnas sanas, mientras que los cuerpos vertebrales no son buenos predictores, ya que añaden un gran margen de error sobre las formas originales.

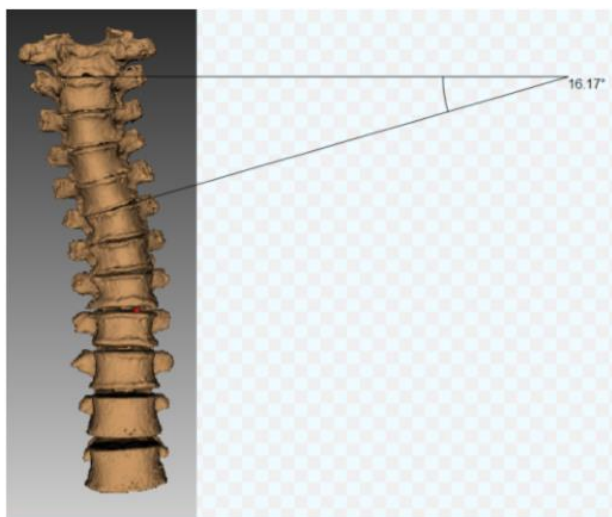


Fig. 377 Medición del ángulo de Cobb para conocer la máxima desviación existente en la columna torácica del individuo actual africano. ©Alberto Riesco López.

Con respecto a M2, M2b dió un resultado más cercano al original que M2a, por lo que Riesco López expresó el interés de investigar más sobre este hecho con el fin de elaborar una técnica para obtener columnas torácicas mediante un método estandarizado, en el cual se redujese el efecto de factores como las patologías.

Por otro lado, en las reconstrucciones de las columnas del niño de Nariokotome hubo de tenerse en cuenta en primer lugar que, como ya ha sido indicado, hubo un total de 4 vértebras torácicas que no se pudieron emplear para la reconstrucción, por lo que debía tenerse en cuenta que las reconstrucciones realizadas dieron una idea general de cómo era la columna del niño de Nariokotome, pero incluían un ligero error inevitable, debido al hecho de que la forma de las vértebras de los humanos actuales poseen diferencias con respecto a las vértebras de *H. Erectus*.

El estudio realizado Riesco López (2017) demostró la importancia y potencialidad de este tipo de técnicas, de cara al estudio de fósiles que deben ser reconstruidos sin referencias originales. A su vez, se concluyó que el niño de Nariokotome no poseía escoliosis y que se encontraba en la fase III del desarrollo ontogenético (desarrollo de crecimiento) en

lo referente al incremento de la cifosis torácica, enfermedad que causa disminución de espacio de disco intervertebral y acúñamiento vertebral, lo que resulta en un exceso de curvatura (Riesco, 2017).

La información obtenida del proyecto resulta prometedora en el campo de estudio de la reconstrucción de columnas vertebrales. Se trató de una validación preliminar de un método, por lo que la muestra es reducida.

9. 1. 3. 2 Futuras investigaciones

Las metodologías desarrolladas y aplicadas en el trabajo anterior resultaron útiles en el campo de la investigación y divulgación de los resultados obtenidos, por lo que surgió la necesidad de realizar estudios futuros en la misma línea. Un estudio con un mayor número de muestras podría resultar muy productivo, añadiendo más individuos tanto patológicos como sanos, individuos de varios rangos de edad, de distinto sexo e incluso en la medida de lo posible, incluyendo más fósiles de homíninos.

Siguiendo esta línea, dos columnas más (de las especies *Homo sapiens* y *Neandertal*) fueron reconstruidas con el fin de desarrollar futuras investigaciones.

- Columna *Homo sapiens*: la columna que se reconstruyó fue obtenida a partir de las medidas medias, de cada una de las vértebras, realizadas a 12 especímenes *Homo sapiens*. El conjunto estaba constituido por 10 vértebras torácicas (faltan 2 para completar el conjunto).



Fig. 378 A la izquierda comprobando las uniones antes de fijar las vértebras de la columna vertebral del *Homo Sapiens*. A la derecha, ya habían sido unidas tres vértebras. ©María Ávila Rodríguez.

- Columna *Neandertal*: las vertebrae de esta columna se obtuvieron con la media de 4 individuos *Homo Neandertal* a partir de los restos de 4 yacimientos.



Fig. 379 A la izquierda la columna vertebral de *Homo sapiens* con todas sus piezas aún sueltas. En el centro se observa la columna vertebral dividida aún en dos, antes de unir ambas partes. Por su parte la última fotografía muestra cómo se unían las vértebras de la columna de *hombre de Neandertal*. ©María Ávila Rodríguez.



Fig. 380 Fotografía tomada al final del proyecto donde aparecen las 4 de las columnas reconstruídas (a excepción de la del niño de Narikotome): 1- Columna realizada a partir de la media de los 10 *Homo sapiens*; 2- Columna del individuo actual africano; 3- Columna del individuo actual europeo; 4- Columna realizada a partir de la media de los 4 *hombres de Neandertal*. ©María Ávila Rodríguez.

UCM

9. 2 Estudio de casos realizados a través de la UCM

La Universidad Complutense de Madrid, concretamente la Facultad de Bellas Artes, constituye el centro en el cual la autora de la presente tesis ha cursado sus estudios de Licenciatura de Bellas Artes, con especialidad en Conservación y Restauración del Patrimonio, así como su Máster en Conservación preventiva del Patrimonio y, por último, el programa de Doctorado. Por ello, a lo largo de estos casi 10 años de formación en el centro, de la mano y arropada siempre por su directora de tesis, Sonia Santos Gómez, ha llevado a cabo diferentes proyectos de Innovación y Mejora de la Calidad Docente, que han servido a la par como estudios de caso de la presente tesis doctoral.

La investigación desarrollada ha sido realizada en piezas pertenecientes a particulares, pero también con obra perteneciente a los Museos y Colecciones Complutenses. El patrimonio de estos museos y colecciones es verdaderamente rico, aunque numerosas piezas presentan un estado de conservación deficiente. Entre otros bienes patrimoniales, se ha contado con obra perteneciente al Museo de Farmacia Hispana.

La UCM es una institución de larga trayectoria y amplio reconocimiento social que aspira a situarse entre las primeras universidades de Europa. Es la heredera de la antigua Universidad de Alcalá de Henares, cuya fundación se remonta a 1499.

En 1836, la Universidad de Alcalá de Henares se cierra y se traslada a Madrid con el nuevo nombre de Universidad Central. En 1927 un Real Decreto marca el inicio de construcción de un ambicioso proyecto de una Ciudad Universitaria para Madrid, en los terrenos de la Moncloa, cedidos por la corona. Entre 1929 y 1932 se concluye el proyecto de Ciudad Universitaria y, en una segunda etapa, coincidente con los años de la II República, se construyen un gran número de edificios que comienzan entonces a funcionar: Hospital Clínico, Facultad de Filosofía y Letras, el conjunto de Ciencias, la Escuela de Arquitectura y el grupo de Residencias de Estudiantes. Desafortunadamente, durante la Guerra Civil (1936-1939) la Ciudad Universitaria se convierte en frente de batalla, con lo que sería destruida parcialmente. Durante la postguerra, se produce la reconstrucción de la Ciudad Universitaria y se levantan otros edificios no presentes en el proyecto original. A partir de los años sesenta se ceden solares para levantar edificios de uso no estrictamente universitario: Facultad de Estadística, el Colegio Mayor “Aquinas”, la Casa do Brasil y la

Escuela de Ingenieros de Telecomunicaciones, entre otros muchos edificios. En 1999 la Ciudad Universitaria es declarada Bien de Interés Cultural con la categoría de Conjunto Histórico y en el 2000 se aprueba el Plan Especial de la Ciudad Universitaria por parte del Ayuntamiento de Madrid. Además de ampliar algunas facultades, se construyen también nuevos edificios (Uned, s.f. a).

Dentro de la Ciudad Universitaria se constituye en 1978 la Facultad de Bellas Artes, como resultado del tercero y definitivo proceso integrador de las enseñanzas artísticas a los estudios universitarios en España. Esta integración definitiva incorpora la experiencia pedagógica y creativa de la Escuela de Bellas Artes de San Fernando y la tradición humanística, científica e investigadora de la Universidad Complutense de Madrid (Ucm, s.f. c).

La Universidad Complutense, por tanto, posee un rico patrimonio distribuido en quince colecciones y catorce museos. La existencia de este patrimonio se debe a su propia historia ya que, en parte, está integrado por material didáctico de carácter histórico, como los modelos y anatómicos, colecciones de minerales e instrumental científico, entre otros, pero también constituye la herencia de La Universidad Cisneriana, fundada en 1499 en Alcalá de Henares. Además de la colección de la Facultad de Farmacia y otras, pueden destacarse las obras que alberga la Facultad de Bellas Artes, vinculada a la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando, que conserva una colección de dibujos de la Academia y los exámenes de los “Pensionados de Roma” (San Andrés, 2015, p.4 y 5.)

9. 2. 1 Proyecto nº 1: *Incorporación de la tecnología 3D a las enseñanzas de las asignaturas de conservación- restauración de bienes culturales y a las vinculadas al ámbito escultórico*

El primer estudio de caso que se presenta constituyó una primera aproximación del empleo de las tecnologías 3D en el ámbito de la conservación de bienes culturales por parte del equipo investigador que participó en el mismo. Corresponde al trabajo desarrollado durante un proyecto de Innovación y Mejora de la Calidad Docente llevado a cabo durante el curso académico 2013-2014. Este proyecto llevaba por título *Incorporación de la tecnología 3D a*

las enseñanzas de las asignaturas de conservación- restauración de bienes culturales y a las vinculadas al ámbito escultórico. El objetivo general del proyecto consistía en desarrollar una metodología de trabajo con el fin de emplear las herramientas 3D por parte del alumnado de las asignaturas Conservación y Restauración de Arte Contemporáneo II y a Metodología de Conservación y Restauración de Escultura I, del Grado de Conservación y Restauración del Patrimonio Cultural, así como también a las asignaturas Tecnologías Digitales y Estrategias Artísticas, del Grado de Bellas Artes (Ucm, 2014). El proyecto estaba formado por 10 participantes: Además de Sonia Santos Gómez, coordinadora del proyecto, y María Ávila Rodríguez, autora de la presente tesis, en el proyecto participaron diferentes profesores de los departamentos de Pintura y Conservación-Restauración y Escultura, así como *alumni* y alumnos de doctorado: Elena Blanch, Montaña Galán, Margarita San Andrés, Lucio Zurdo, Pedro Ángel Terrón, Rita Gil, Silvia Álvarez y José Carlos Espinel Velasco. La autora de la presente tesis doctoral trabajó activamente en cada una de las fases del proyecto.

En el proyecto se plantearon, entre otros, los siguientes objetivos específicos (Ucm, 2014):

1. Digitalización de diversas obras con escáner 3D.
2. Impresión 3D de las obras digitalizadas y realización de los moldes y positivos en resina de las piezas, así como comprobación de que la reintegración volumétrica o la reproducción de la pieza se ajustaban al original o a las necesidades de restauración de la pieza.
3. Creación de una obra mediante el empleo de programas de modelización 3D, su materialización mediante impresora 3D y posterior fundición a partir de la propia impresión 3D.
4. Con la metodología de reproducción de bienes culturales desarrollada y explicada detalladamente en los vídeos se lograría la reproducción de los mismos sin necesidad de utilizar sobre ellos otras técnicas más invasivas y más tradicionales como por ejemplo los moldes de silicona que pueden suponer alguna alteración del original.

9. 2. 1. 1 Desarrollo del proyecto

La metodología seguida en el proceso implicó el planteamiento y desarrollo de distintas fases:

. Selección de piezas para ser reproducidas: *trilobite* y *terra sigillata*, pluma de urraca y piel de dromedario (todas ellas pequeñas piezas pertenecientes a colecciones particulares del grupo de investigación). Igualmente, se utilizaron piezas que se encontraban ya en archivo 3D: una de ellas, una medalla, fue modelada por uno de los miembros del equipo investigador, José Espinel; la otra fue una vértebra caudal media de dinosaurio, cuyo escaneado y reconstrucción 3D fue realizado por Daniel Vidal, participante en el Proyecto PALDES en el que trabajó junto al resto de investigadores del Grupo de Biología Evolutiva de la UNED. El tratamiento que se dio a estas piezas será comentado en detalle en líneas posteriores.

. Escaneado 3D de las piezas a reproducir (*trilobite*, *terra sigillata*, pluma de urraca y piel) y preparación de los archivos para su impresión.

. Impresión de las piezas con impresora 3D y repaso de las impresiones.

. Realización de los moldes de aquellas piezas que serían reproducidas a partir de los positivos impresos, para después realizar su posterior vaciado con coloración final y repaso del vaciado obtenido.

. Por su parte, la impresión de la medalla diseñada sería enviada a la fundición para convertirla en plata.

9. 2. 1. 1. a Selección de las piezas

Las piezas fueron escogidas por presentar notorias diferencias morfológicas y ser todas ellas distintas entre sí, a fin de comprobar la eficacia de la metodología empleada (Santos, 2017a, p.100). A la hora de seleccionar las piezas que serían reproducidas debía tenerse en cuenta el tamaño de las mismas puesto que este no podría exceder de 43x27x180mm, tamaño

máximo que la impresora podía asumir (sus características se verán más adelante). De este modo, el *trilobite* y la *terra sigillata* fueron escogidos por su tamaño, sus colores y el conjunto de sus características generales.

9. 2. 1. 1. b Escaneado de las piezas

Así, una vez seleccionas todas las piezas que debían ser digitalizadas para después ser impresas, tanto las que iban a ser reproducidas como las que no, se procedió a escanear su superficie mediante el escáner 3D Konica Minolta VI-910, propiedad de la Facultad de Bellas Artes de la UCM. El equipo funciona por triangulación y está equipado con lentes intercambiables que permiten registrar objetos de diversos tamaños y distancias desde las lentes. Para escanear la pieza, esta se coloca en la plataforma giratoria, a una distancia y alturas adecuadas. El escáner enfoca el haz del láser sobre el objeto y capta los rayos reflejados por el objeto empleando para ello la CCD (la cámara) para su medición (Santos, 2015a). Con los escaneados se van generando distintas mallas y el propio software del escáner (Polygon Editing Tool) permite su alineamiento.



Fig. 381 Escáner empleado para la digitalización de las piezas. ©Sonia Santos Gómez.

Cuando se habían realizado todas las tomas necesarias para configurar el volumen completo de la pieza en 3D, el proceso de digitalización había finalizado. Posteriormente, se mejoraron los resultados del escaneado mediante el empleo del programa Rapidform, que se empleó para coser la pieza y retocar los agujeros existentes en las mallas (Santos, 2017a, p.100).



Fig. 382 Trilobite en la plataforma giratoria. ©Sonia Santos Gómez.



Fig. 383 Digitalización del *trilobite*. Puede verse el haz rojo del láser que recorría la pieza una y otra vez para obtener la información referente a su superficie y configurar así el modelo 3D. Arriba a la izquierda puede verse en detalle el láser incidiendo sobre la pieza. ©Sonia Santos Gómez.

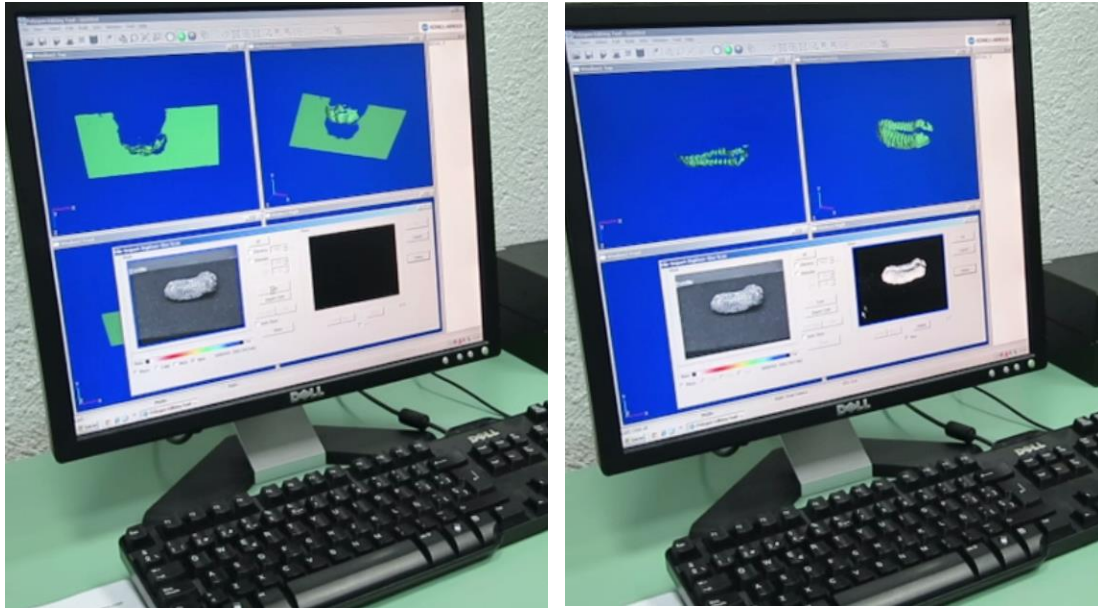


Fig. 384 En las pantallas puede verse como el software trabajaba construyendo el modelo 3D. Conforme se avanza en el proceso, se van obteniendo más capturas que se van uniendo para formar así el modelo 3D completo. ©Sonia Santos Gómez.



Fig. 385 Posteriormente, se empleó el programa Rapidform a fin de mejorar los resultados del escaneado (a la izquierda). A la derecha puede verse el modelo del *trilobite* retocado. ©Sonia Santos Gómez.

Se digitalizaron de este modo el *trilobite*, la *terra sigillata*, la pluma de urraca y un trozo de piel de dromedario.

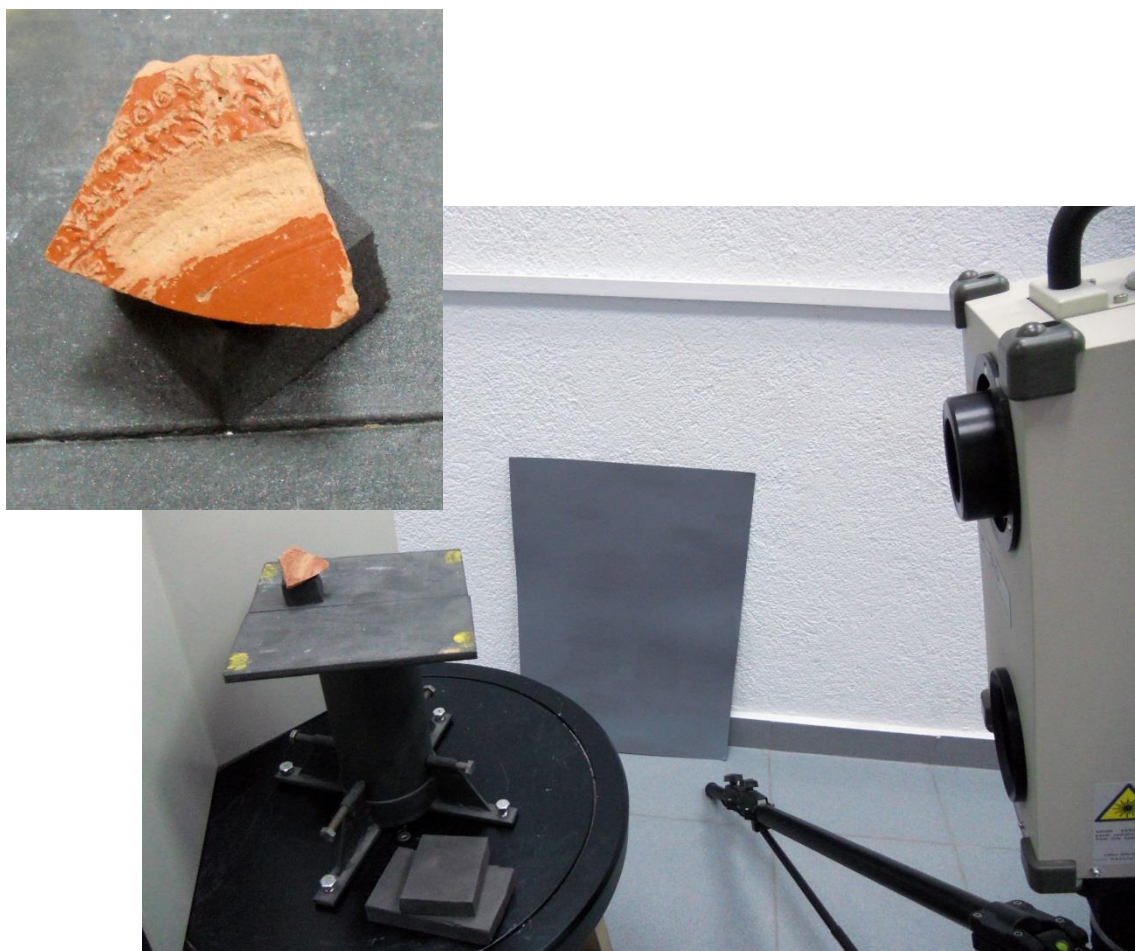


Fig. 386 Digitalización de la *terra sigillata*. ©Sonia Santos Gómez.

Aunque se conocía de antemano la dificultad del escaneado de la pluma de urraca y un trozo de piel de dromedario, se decidió abordarla a fin comprobar hasta qué punto los resultados podrían ser más o menos satisfactorios. Como se preveía, la textura del pelo y de la pluma dio lugar a que la unión de las mallas generadas durante el escaneado de la pieza resultase deficiente y no proporcionaron los resultados esperados puesto que, además, las prestaciones del escáner no se ajustaban a las complejas características de la textura y dimensiones de las piezas. Se espera, por tanto, mejorar estos últimos resultados mediante la utilización de otros sistemas de digitalización, por ejemplo, mediante fotogrametría.

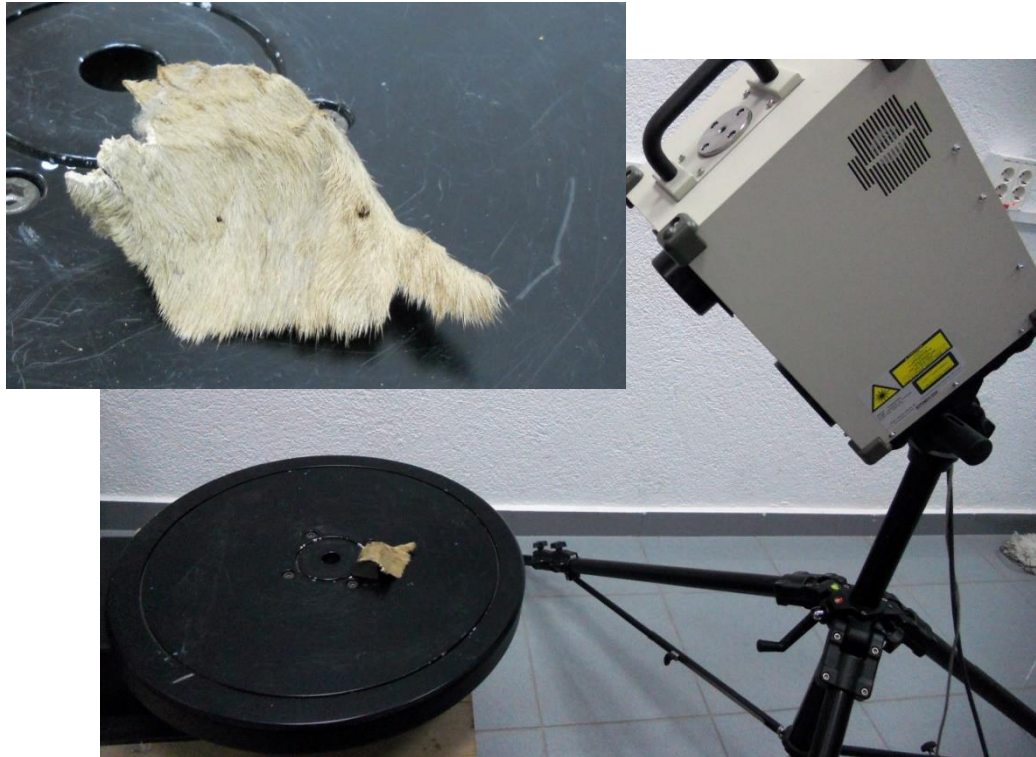


Fig. 387 Escaneando la piel de dromedario. ©Rita Gil Macarrón.

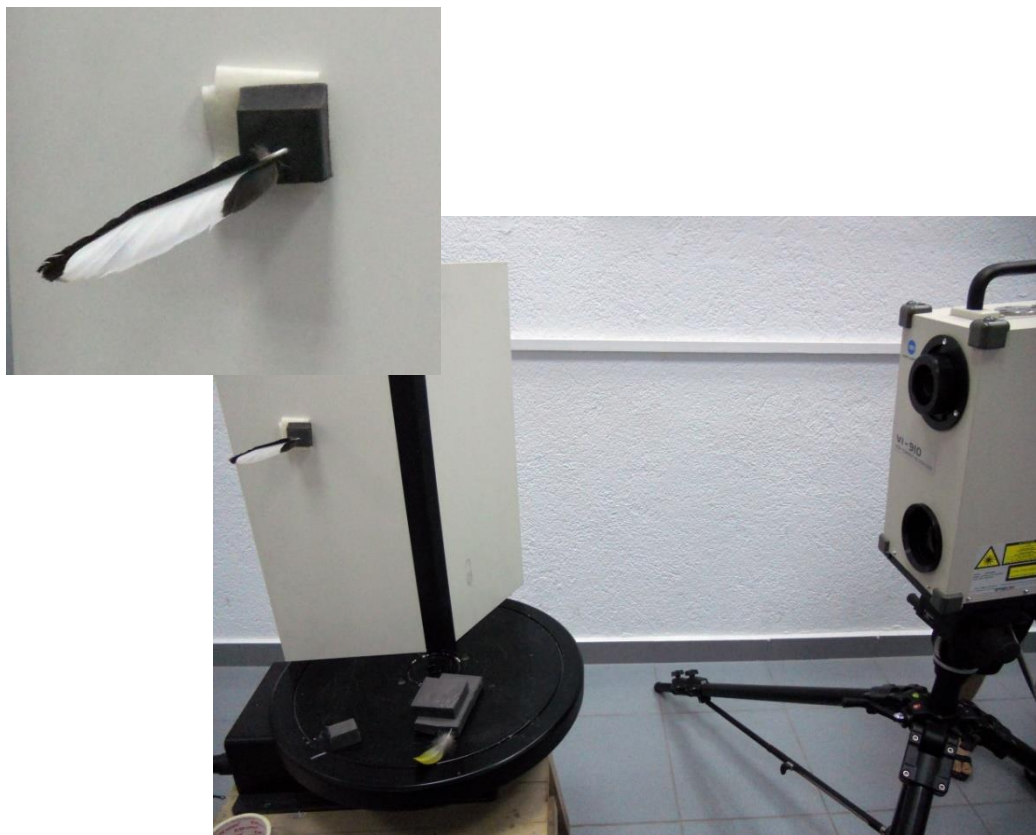


Fig. 388 Digitalización de la pluma. ©Rita Gil Macarrón.

Una vez mejorados los escaneados con el programa Rapidform, como se ha indicado, los dos archivos del *trilobite* y la *terra sigillata* se encontraban listos para su impresión.

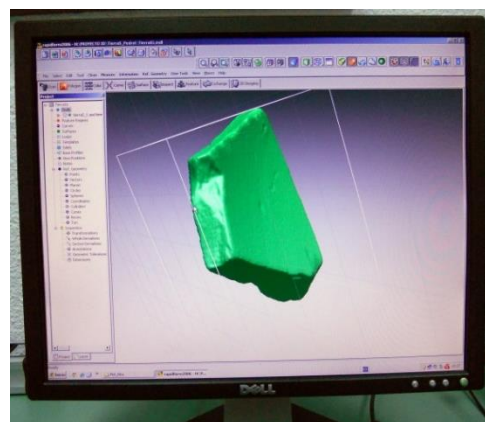
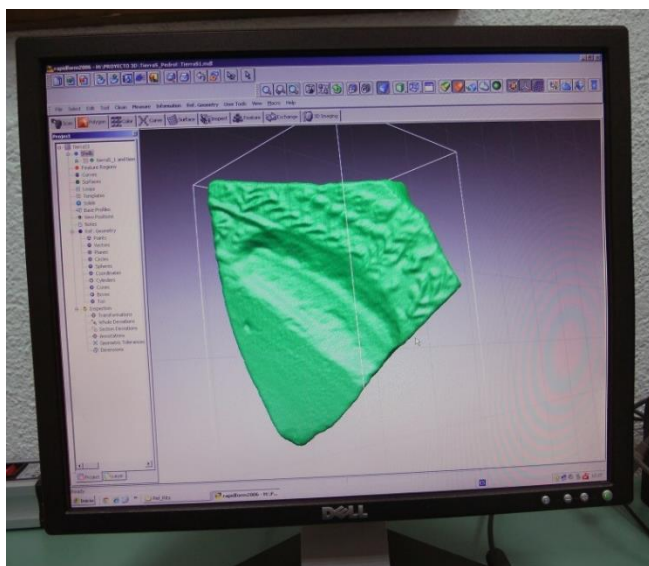


Fig. 389 La pieza de la *terra sigillata* en Rapidform, donde fue retocada y preparada antes de imprimirse. ©Sonia Santos Gómez.

Se contaba además, recordando líneas anteriores, con dos archivos correspondientes a dos piezas ya digitalizadas: uno de ellos era una pieza diseñada mediante programas de modelado 3D por uno de los participantes del proyecto, José Carlos Espinel y una vértebra caudal media del holotipo de *Spinophorosaurus nigerensis*, *Dinosauria Saurópoda*¹³⁶ que había sido previamente digitalizada dentro del Proyecto PALDES¹³⁷ por el equipo de investigadores del Grupo de Biología Evolutiva de la UNED (Ucm, 2014), como se ha indicado.

¹³⁶ Ejemplar GCP-CV-4229 depositado provisionalmente en el Museo Paleontológico de Elche.

¹³⁷ PALDES es un Proyecto para el desarrollo del Sahara nigerino mediante la utilización de su patrimonio paleontológico como recurso socio-cultural. El proyecto comenzó en el año 2003 cuando una serie de instituciones científicas y sociales españolas se reunían tras la invitación de una Asociación nigerina denominada AJOPER (Association pour la Protection, la Surveillance et l'Entretien des Sites de Dinosauriens) que solicitaba ayuda para la puesta en valor, el análisis, la gestión y la promoción como recurso turístico de los yacimientos de dinosaurios bajo su custodia. En diciembre de 2003-enero de 2004 se realizó una primera expedición coordinada por el Grupo Paleontológico de Elche, financiada fundamentalmente por la Generalitat Valenciana y aportaciones privadas y compuesta entre otros por miembros del Grupo Paleontológico de Elche, paleontólogos de la Universidad Autónoma de Madrid y el Museo de Historia Natural de Lisboa, un fotógrafo y miembros del Centro de Estudios Saharahuis Bir Lelhu. Como resultado de esta expedición, se valoró muy positivamente el patrimonio paleontológico de la zona por lo que se llegaron a acuerdos con AJOPER y la administración local para generar un proyecto conjunto. Por tanto, a lo largo de los años 2004 y 2005 plantearon proyectos como la creación de un museo local que permitiese la gestión sobre el terreno de los yacimientos, la formación de un grupo adecuado para desarrollar los objetivos planteados y la consecución de los fondos necesarios. En 2007 se dio por finalizada la campaña de campo del Proyecto Paldes (Godzillin, 2006).

José Carlos Espinel (2016), profesor del Departamento de Escultura de la Facultad de Bellas Artes de la UCM desde 2016, se encargó del diseño de la pieza incluida en este proyecto como caso de estudio de su tesis doctoral *Procesos digitales y sistemas de prototipado rápido aditivos aplicados a la creación escultórica de pequeño formato y relieves*. En su tesis, tal y como se ha indicado en el capítulo 2, experimenta el proceso de generar volúmenes a partir de fotografías empleando programas de modelado, con el fin de imprimir los modelos y conseguir materializar relieves, algo muy útil en el ámbito de las Bellas Artes, muy especialmente a la hora de realizar medallas. De este modo, investigó sobre el funcionamiento del sistema de *displacement maps*, muy interesante puesto que una imagen en 2D podía ser traducida en un volumen tridimensional aplicándole un programa de modelado. El primer paso consiste en definir el número de niveles principales que tendrá el relieve y para cada uno de esos niveles se creará una imagen que definirá los elementos cuya altura de relieve se encontrará entre la altura máxima del nivel anterior y la mínima del superior. Así, si el color blanco es el valor más alto y el negro el más bajo.

Una vez se ha obtenido la imagen definitiva, es aplicada en el programa de modelado tridimensional donde todavía se pueden hacer algunos ajustes que pueden influir sobre el resultado final de una manera determinante, como puede ser el nivel de profundidad, lo que hace que de una misma imagen se puedan obtener resultados muy diversos (Espinel, 2016, pp.164-179).

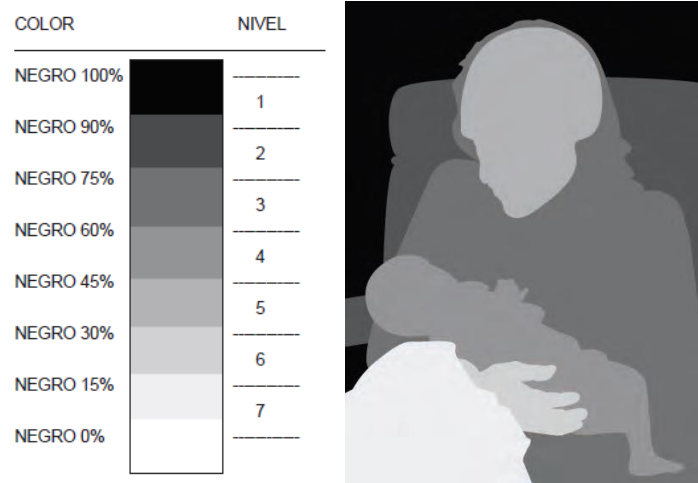


Fig. 390 La escala de la izquierda muestra la escala de grises, blanco y negro expresados como porcentajes de negro y los niveles en los que se divide el relieve según esos porcentajes. Así, por ejemplo, el nivel número 6 se encuentra entre el negro al 30 % y el negro al 15 %. Por su parte a la derecha aparece la imagen dividida por niveles según el color más oscuro que habrá en cada nivel. ©José Carlos Espinel.

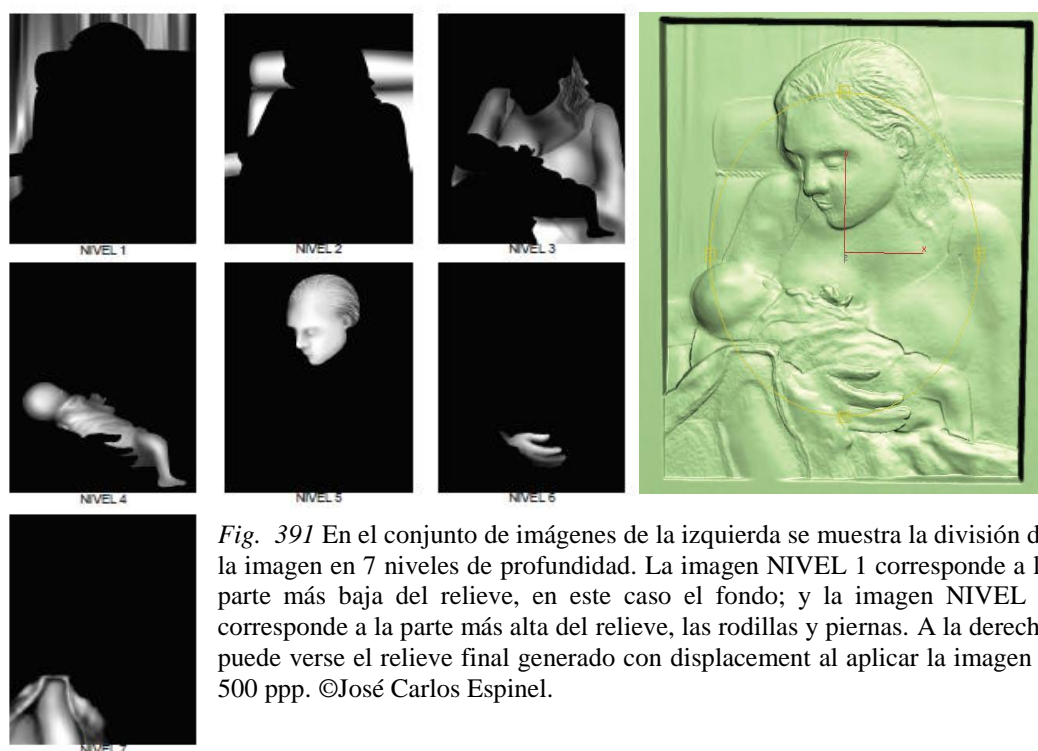


Fig. 391 En el conjunto de imágenes de la izquierda se muestra la división de la imagen en 7 niveles de profundidad. La imagen NIVEL 1 corresponde a la parte más baja del relieve, en este caso el fondo; y la imagen NIVEL 7 corresponde a la parte más alta del relieve, las rodillas y piernas. A la derecha puede verse el relieve final generado con displacement al aplicar la imagen a 500 ppp. ©José Carlos Espinel.

Una vez terminada la imagen, se ha de aplicar en el programa de modelado 3D como mapa de desplazamiento. Los mapas de desplazamiento se aplican sobre polígonos ya creados, de modo que lo primero que debe hacerse es generar un plano o polígono del tamaño en que se desee prototipar la pieza. Aunque los programas de modelado 3D permiten escalar el modelo posteriormente, Espinel aconseja hacerlo al tamaño definitivo para poder visualizar los errores que se podrán apreciar en la pieza definitiva (Espinel, 2016, pp.186 y 187).



Fig. 392 Modelo 3D de la medalla finalizado. ©José Carlos Espinel.

Por su parte, la vértebra pertenecía al conjunto de restos que en 2007 el grupo de científicos españoles encontró en los yacimientos nigerianos de *Tadibene*. Entre ellos, se encontraron el 70% de un esqueleto de *saurópodo* de unos 7 metros de longitud y de unos cien millones de años de antigüedad, muestras de dientes y escamas de peces, así como otros restos de dinosaurios *terópodos* y *saurópodos*, y unas 15 vertebras de dinosaurio bebé (Efe,2007).

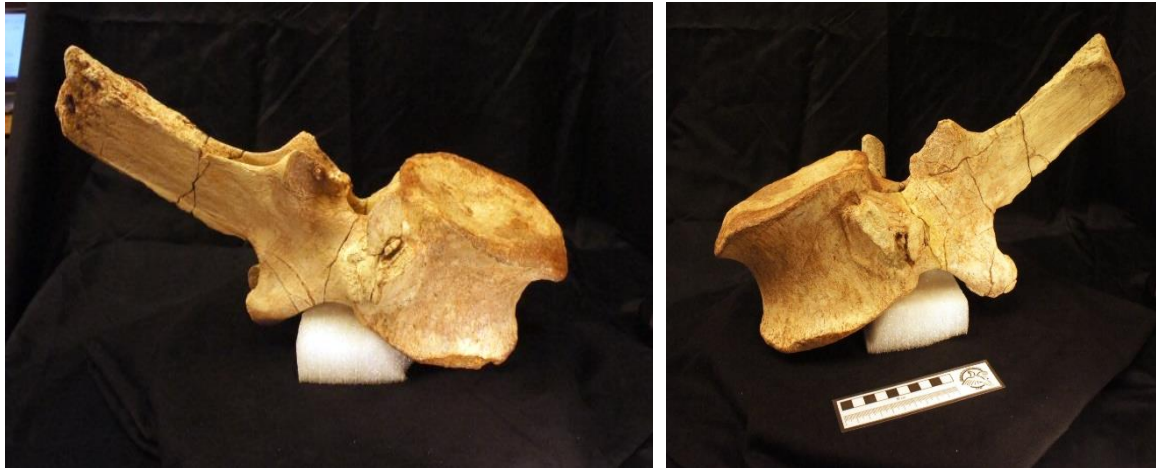


Fig. 393 Vértebra de *saurópodo* perteneciente al conjunto de los restos hallados en los yacimientos nigerianos de *Tadibene*. © Fátima Marcos-Fernández.

9. 2. 1. 1. c Impresión de las piezas

Una vez los cuatro archivos (el *trilobite*, la *terra sigillata*, la pieza de Espinel y la vértebra) estuvieron listos, comenzó el proceso de impresión de los modelos.

El equipo para imprimir las piezas del proyecto fue la impresora 3D Projet 1200 de 3D Systems, que adquirió el equipo de investigación del que forma parte Sonia Santos Gómez. La impresora proporciona una alta precisión y detalle y acabado de calidad, aunque la pieza a imprimir ha de ser de pequeño tamaño, como se ha indicado, por lo que es muy empleada en la impresión de componentes electrónicos o de joyería (Santos, 2017a, p.102). Por otra parte, otra prestación de esta impresora consiste en que, una vez creada la pieza, puede utilizarse en fundición de la misma manera que se trabaja con modelos en cera.

El primer paso consistió primeramente en abrir el archivo STL que contenía la información de la pieza desde el software de la impresora, Geomagic Print.

Antes de iniciar el proceso de impresión, el software exigía que la pieza fuese colocada en el interior de un prisma que aparecía en la pantalla. Este paso era realmente imprescindible puesto que los límites del prisma constituían las dimensiones máximas que podía tener la pieza impresa.

De este modo, la impresora permitía imprimir un volumen de 43x27x180 mm con una resolución de 585 dpi y un espesor entre capas de 30 micras. El material de impresión era una resina expandida en forma de cartucho, que debía estar situada en el interior de la impresora en cantidad suficiente. Se trataba de una resina acrílica fotopolimerizable que se comercializaba como Visijet FTX Green y que solidificaba en capas mediante luz ultravioleta.

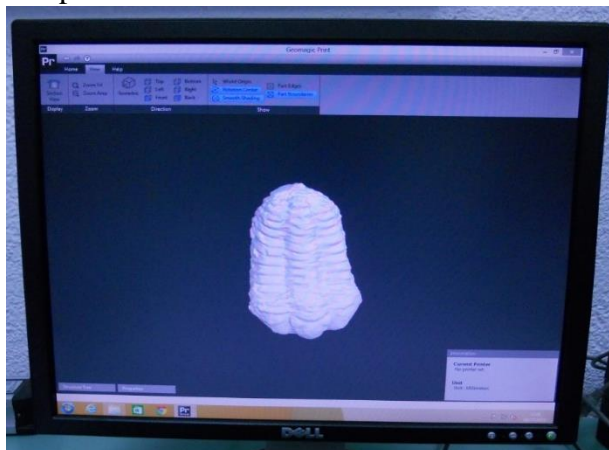


Fig. 394 *Trilobite* visualizado desde Geomatic Print, el software de la impresora. ©Sonia Santos Gómez.

Durante la impresión, el equipo construía soportes que sustentaban la pieza impresa sobre la pletina de trabajo. Para la impresión del *trilobite*, primera pieza que se imprimió, el programa asignó una duración del proceso de 67 minutos. Una vez aceptado el proceso, el contador de la impresora fue restando los minutos que faltaban para la finalización del proceso.



Fig. 395 Impresora 3D empleada para la impresión de las piezas. A la izquierda la impresora cerrada y, a la derecha, abierto el compartimento donde se colocan los cartuchos de la resina y la pieza se imprime. ©Sonia Santos Gómez.



Fig. 396 En la parte superior puede verse el cartucho de la resina. Este se comercializa tapado con un plástico que impide que el líquido se derrame. Cuando el cartucho va a insertarse en su posición para comenzar la impresión, el plástico debe ser retirado y puede observarse el contenido líquido del mismo. Tal y como puede verse en las imágenes inferiores, el cartucho se situó en su lugar y se deslizó hacia dentro. ©Sonia Santos Gómez.

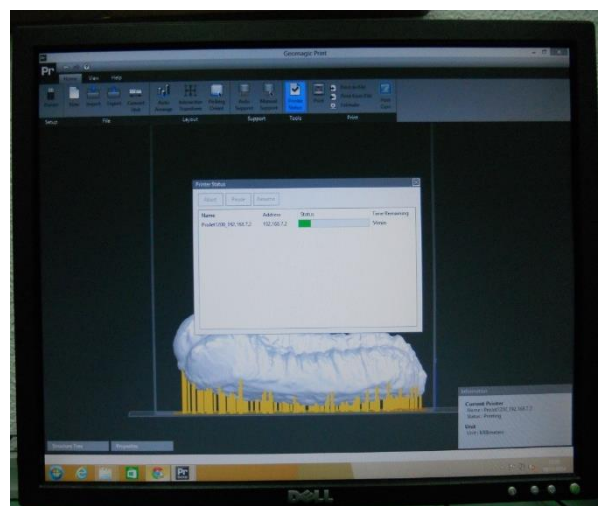
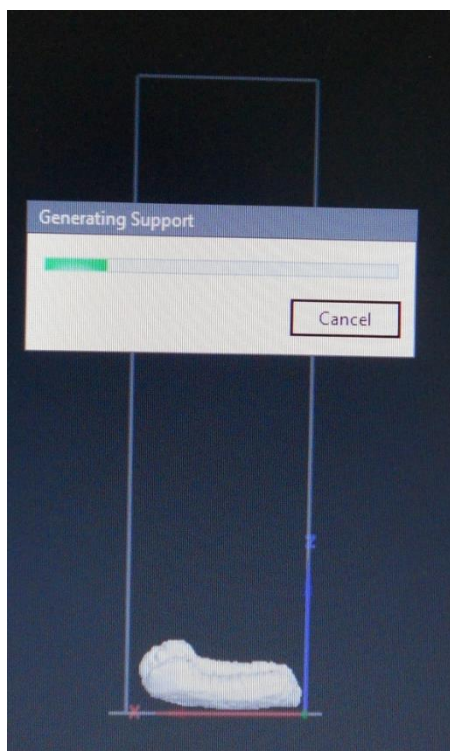
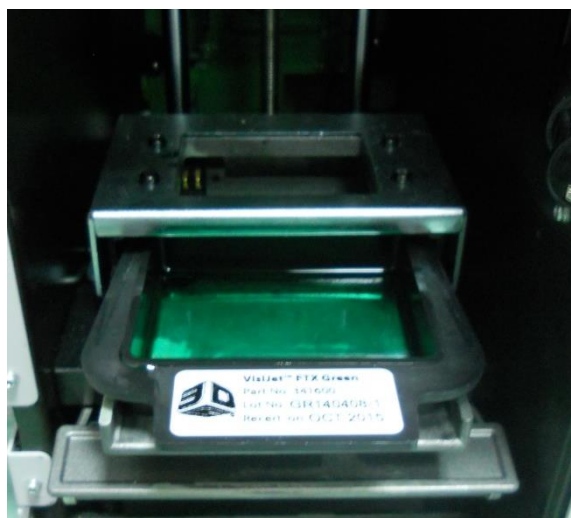


Fig. 397 En la imagen de la izquierda aparece el proceso de construcción de los soportes (“generating support”) que sostendrían la pieza durante su impresión. Mientras que en la imagen derecha puede verse la pieza con los soportes en amarillo cuando la impresión ya estaba en proceso y faltaban 54 minutos para que finalizase. ©Sonia Santos Gómez.



Fig. 398 “Time” (tiempo) restante para finalizar la impresión del *trilobite*. En la secuencia de imágenes puede verse como este iba disminuyendo. ©Sonia Santos Gómez.



Fig. 399 Extrayendo la pieza de la impresora tras su impresión. ©Sonia Santos Gómez.

Cuando la impresión había finalizado, la pieza debía ser sumergida en alcohol isopropílico con el fin de eliminar restos de resina; en este caso se realizaron dos baños sucesivos, cada uno de ellos de pocos minutos



Fig. 400 La imagen superior de la izquierda muestra la pieza siendo sumergida en alcohol isopropílico y a su derecha la pieza ya sumergida. En la imagen inferior aparece el *trilobite* una vez había sido extraída del alcohol tras los dos baños necesarios. ©Sonia Santos Gómez.

A continuación, la pieza limpia debía ser introducida en la cámara de curado, que emplea lámparas Wood, es decir, de radiación UV.

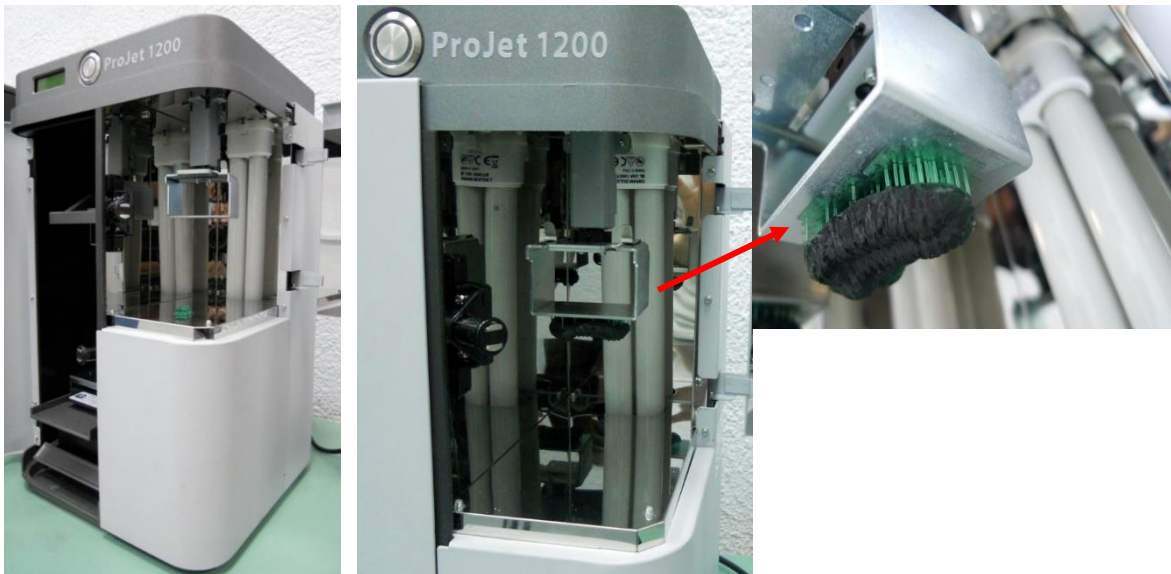


Fig. 401 La impresora cuenta con un compartimento situado a la derecha, que constituye la cámara de curado donde las piezas deben ser introducidas tras recibir los baños de alcohol isopropílico. En la imagen central aparece la pieza situada en la cámara de curado. La imagen de la derecha muestra la pieza en detalle. ©Sonia Santos Gómez.

En este caso, se aplicaron 3 ciclos de curado a la pieza, para que la resina endureciese adecuadamente, puesto que debía resistir su moldeo con aplicación de silicona directamente sobre su superficie. Transcurridos los 3 ciclos, de unos 10 minutos cada uno aproximadamente, se extrajo la pieza de la cámara.



Fig. 402 En la pantalla de la impresora puede leerse “Post Curing”, en referencia al tratamiento que la pieza estaba recibiendo en la cámara de curado. ©Sonia Santos Gómez.

Los soportes que sirvieron de apoyo a la pieza durante el proceso de construcción debían ser eliminados de manera óptima y manual (a punta de bisturí) para que su huella fuese apenas registrada con la silicona que posteriormente se emplearía para realizar el molde (Santos, 2017, p.103).

A continuación, se imprimieron, la *terra sigillata*, la vértebra y la pieza de Espinel, repitiéndose el mismo proceso que el desarrollado con el *trilobite*.

Para la *terra sigillata* fueron necesarios 142 minutos a fin de completar la impresión.

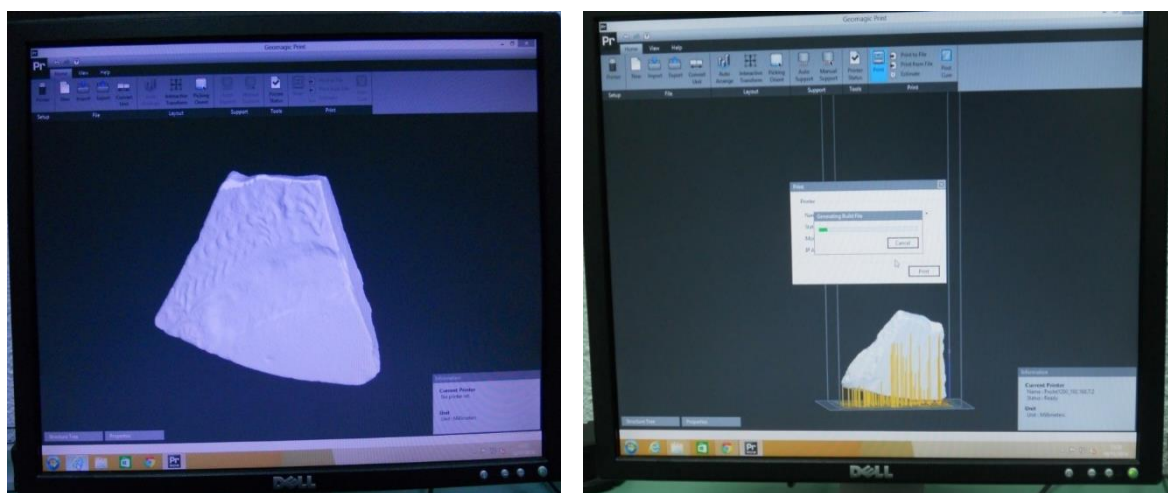


Fig. 403 A la izquierda puede verse el modelo de la *terra sigillata* visualizado desde Geomagic Print. A su derecha, la pieza con los soportes que la sostendrían durante su impresión destacados en amarillo. ©Sonia Santos Gómez.

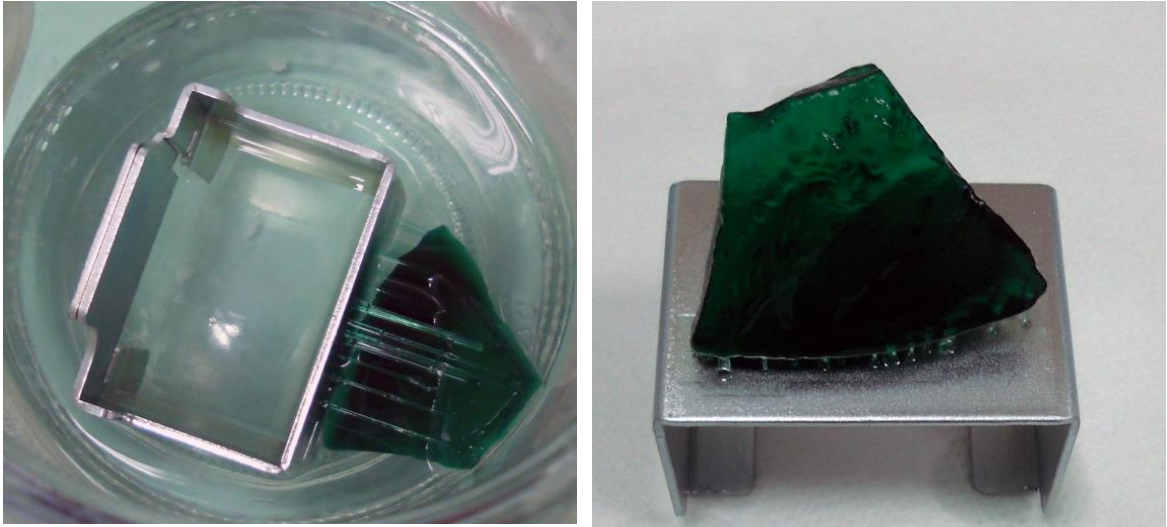


Fig. 404 A la izquierda la pieza sumergida en el alcohol isopropílico y a su derecha la pieza una vez habían finalizado los 2 baños necesarios. ©Sonia Santos Gómez.

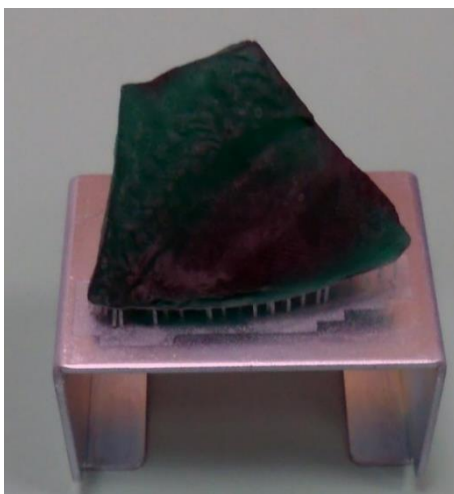
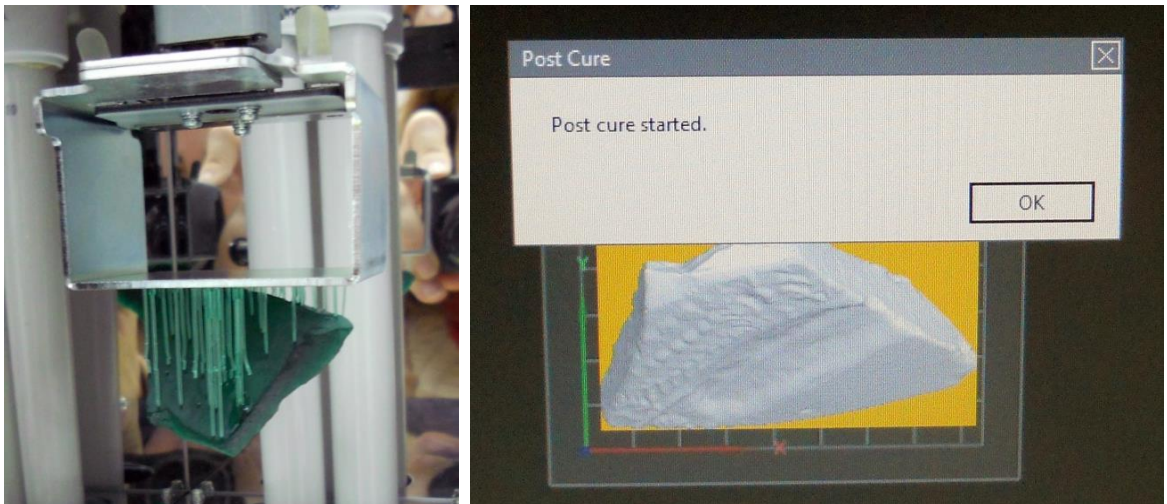


Fig. 405 La imagen superior de la izquierda muestra la pieza dentro de la cámara de curado. A su derecha puede verse el aviso del software indicando que el proceso de curado estaba iniciado. La imagen inferior muestra la pieza ya extraída de la cámara de curado. ©Sonia Santos Gómez.

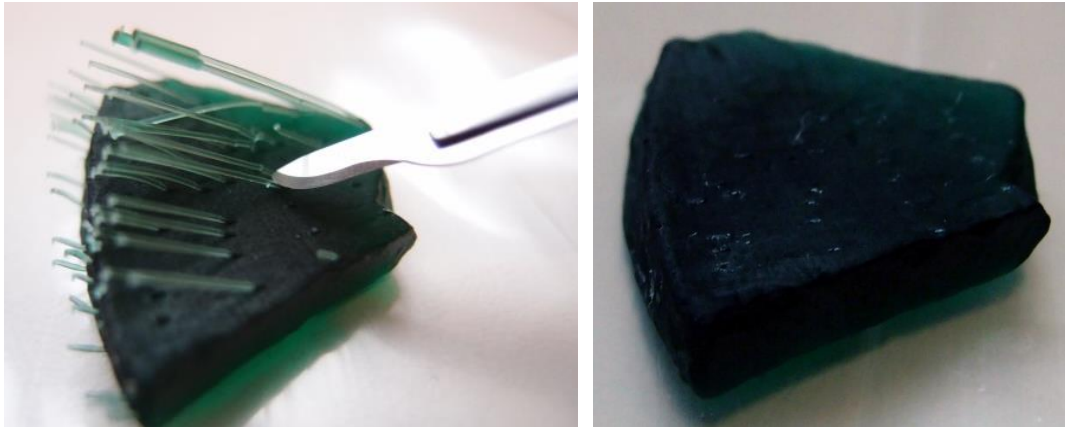


Fig. 406 Proceso de eliminación de los soportes de impresión con la ayuda de un bisturí: a la izquierda eliminando los primeros soportes y a la derecha la pieza sin soportes. ©Sonia Santos Gómez.

Por su parte, para la impresión de la vértebra fueron necesarios 70 minutos.

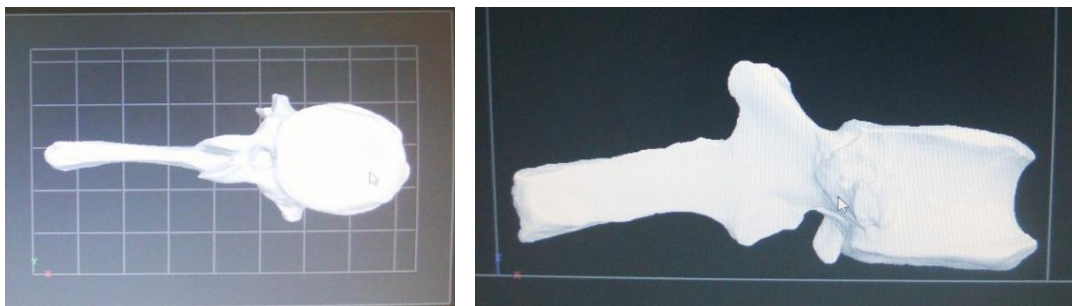


Fig. 407 Encajando la pieza en los límites establecidos por la impresora. A la izquierda la vértebra vista desde arriba y a la derecha un lateral de la misma. ©Sonia Santos Gómez.

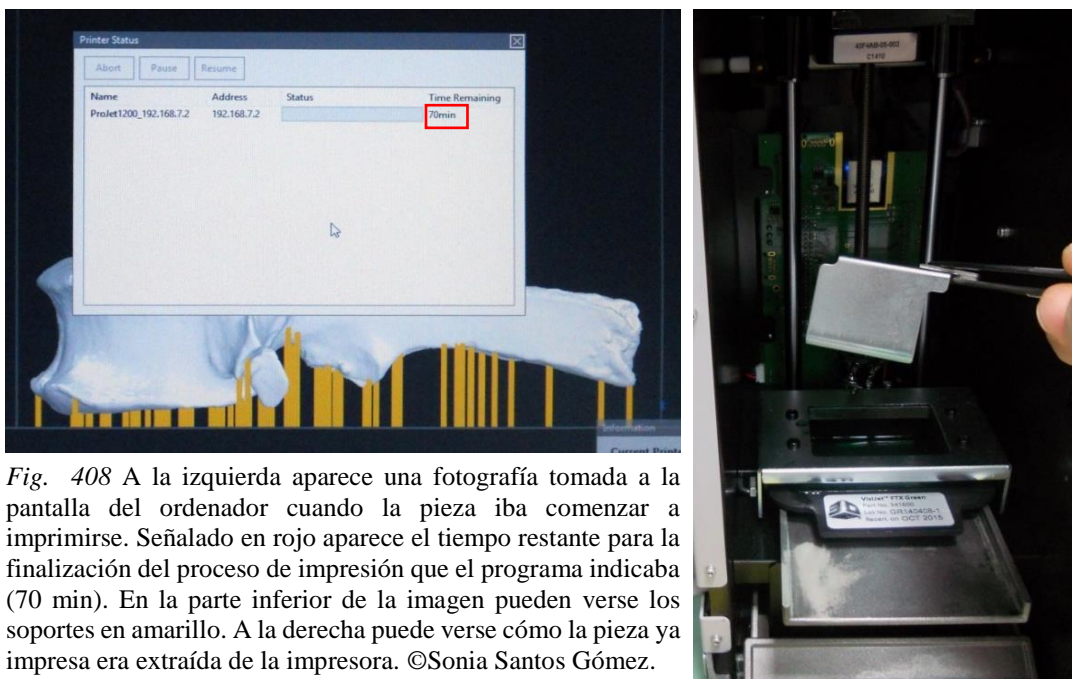


Fig. 408 A la izquierda aparece una fotografía tomada a la pantalla del ordenador cuando la pieza iba comenzar a imprimirse. Señalado en rojo aparece el tiempo restante para la finalización del proceso de impresión que el programa indicaba (70 min). En la parte inferior de la imagen pueden verse los soportes en amarillo. A la derecha puede verse cómo la pieza ya impresa era extraída de la impresora. ©Sonia Santos Gómez.

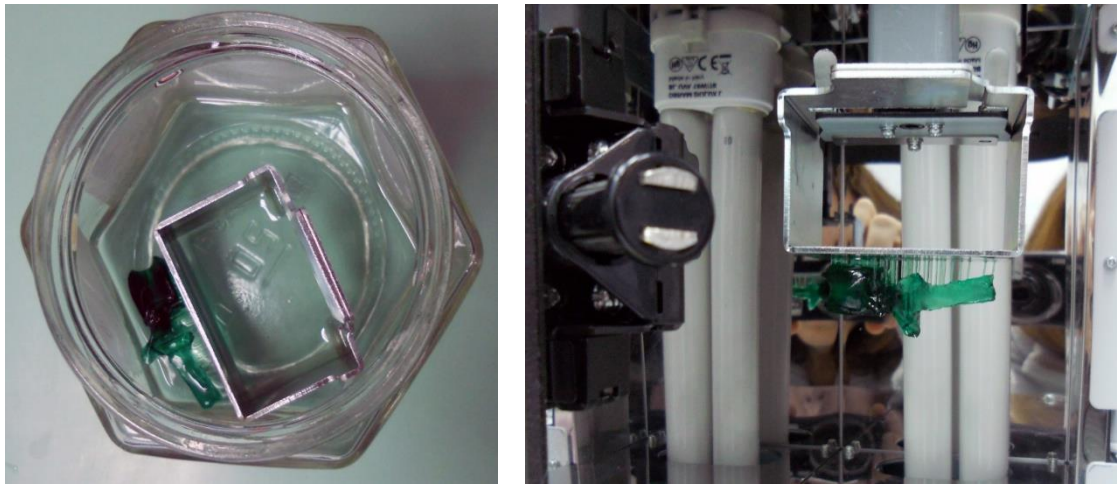


Fig. 409 A la izquierda la pieza sumergida en el alcohol isopropílico y a la derecha en la cámara de curado. ©Sonia Santos Gómez.

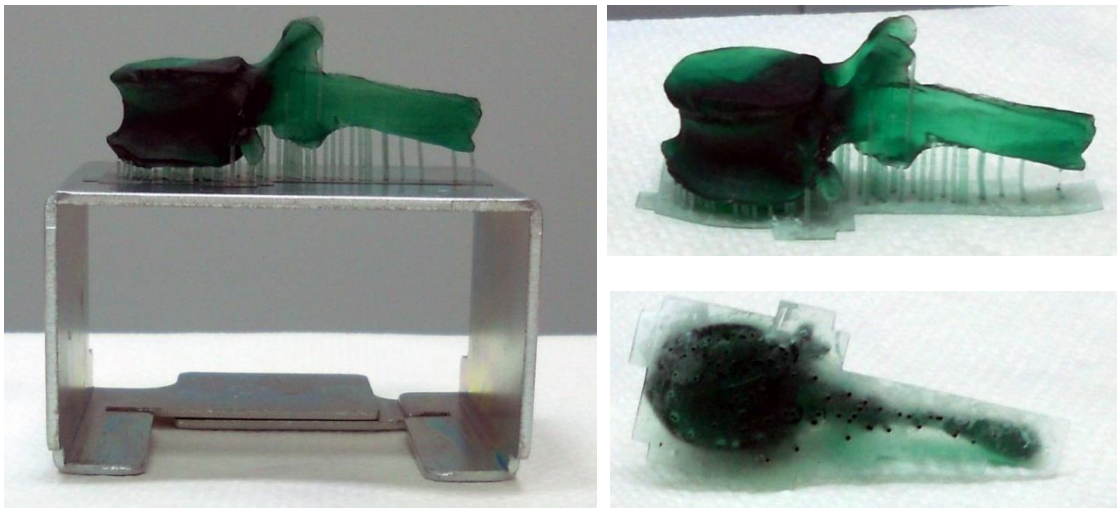


Fig. 410 A la izquierda la pieza ya extraída de la cámara de curado. A la derecha, puede verse como se le había retirado la plataforma de impresión y se aprecian los soportes. ©Sonia Santos Gómez.

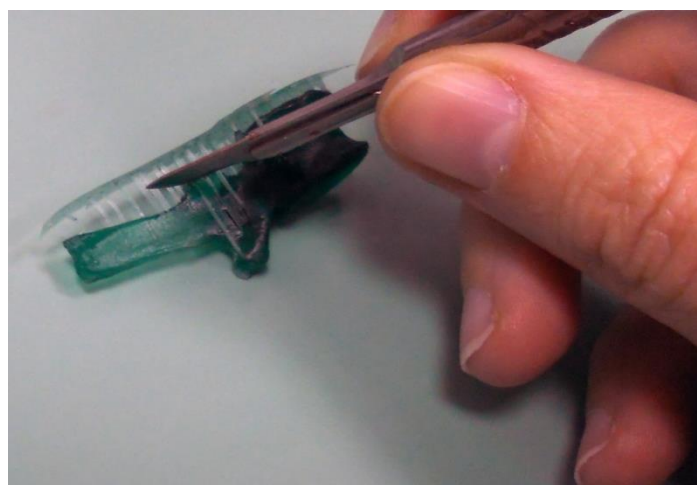


Fig. 411 Retirando los soportes con el bisturí. ©Sonia Santos Gómez.

Por lo que a la medalla de Espinel respecta, fueron necesarios únicamente 10 minutos para su impresión.

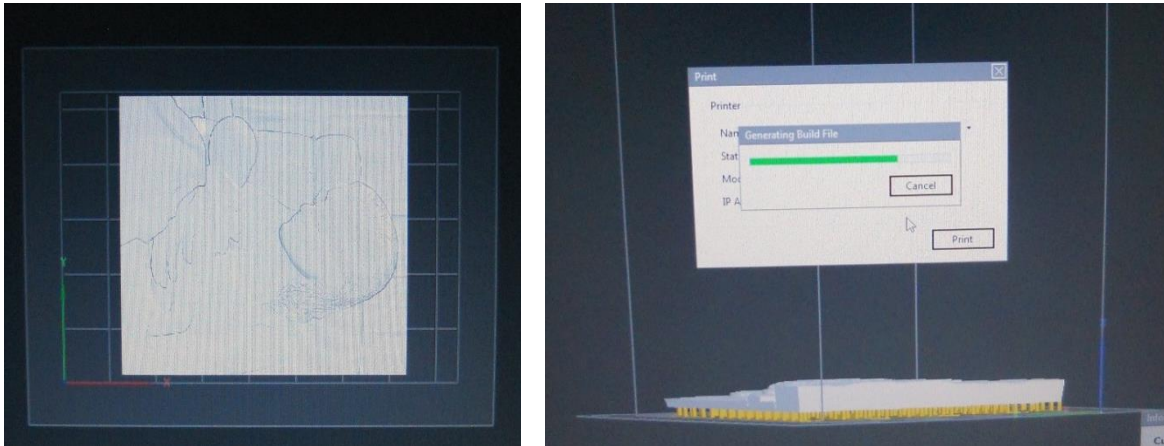


Fig. 412 A la izquierda el encaje de la medalla en los límites establecidos por la impresora y a la derecha la pieza con los soportes en amarillo. Una vez más el software de la impresora construyó los soportes necesarios para su impresión. ©Sonia Santos Gómez.

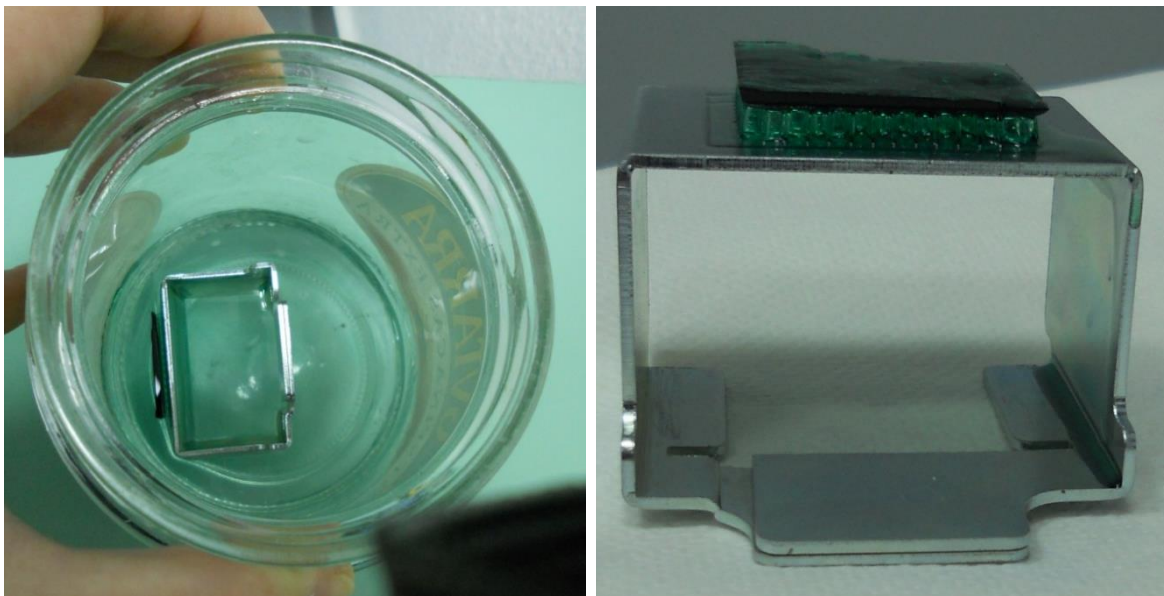


Fig. 413 A la izquierda la pieza sumergida en el alcohol isopropílico y a la derecha una vez había sido extraída de los baños en el alcohol. ©Sonia Santos Gómez.

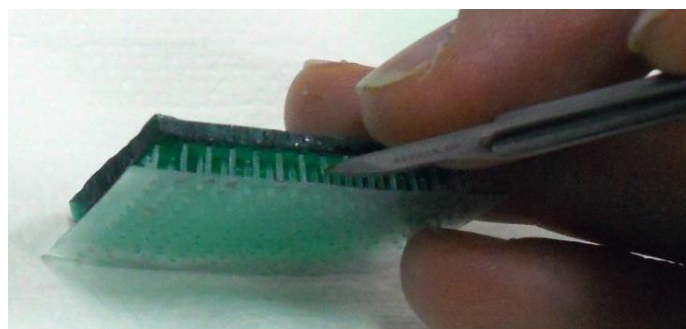


Fig. 414 Eliminando los soportes con un bisturí. ©Sonia Santos Gómez.

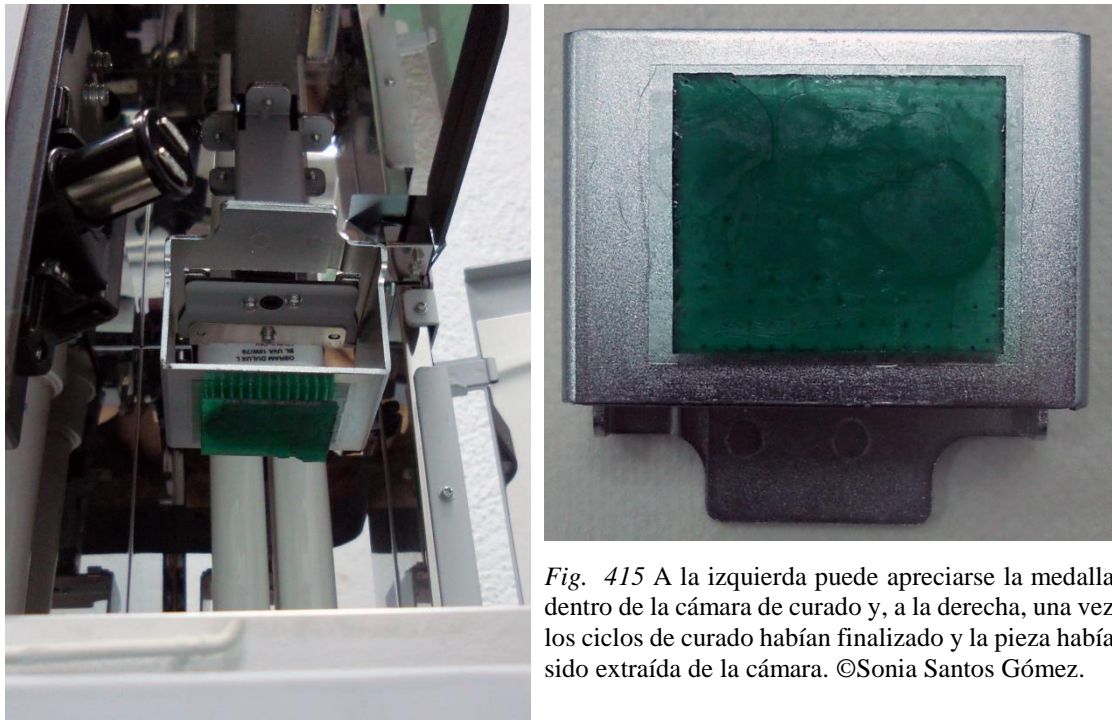


Fig. 415 A la izquierda puede apreciarse la medalla dentro de la cámara de curado y, a la derecha, una vez los ciclos de curado habían finalizado y la pieza había sido extraída de la cámara. ©Sonia Santos Gómez.

9. 2. 1. 1. d Realización de los facsímiles del *trilobite* y la *terra sigillata*

Como ya ha sido indicado, a partir de las piezas de la *terra sigillata* y el *trilobite* impresas en resina se planificó también la realización de sus reproducciones. De este modo, una vez las piezas estaban impresas, bien curadas y sin los soportes de impresión, era el momento de realizar el vaciado de las mismas, con el fin de obtener sus facsímiles.

Los pasos a seguir, a continuación, desarrollados en detalle, fueron los siguientes:

- Molde de silicona.
- Carcasa de escayola.
- Pruebas de resina.
- Vaciado.
- Repaso del vaciado.

Cada pieza fue vaciada en un molde individual y dado su reducido tamaño, únicamente fue necesaria la realización de dos partes por cada molde.

El primer paso para ambos moldes (realizados con la misma metodología) fue colocar una plancha de plastilina de unos 5 mm que configurase el plano de junta del molde, una base que pasa por el ecuador de la pieza. Con un palillo de modelar se ajustó la junta entre el plano y el modelo, a fin de impedir que la silicona que posteriormente se aplicaría, se deslizase y perdiese entre los huecos que pudieran quedar.



Con más plastilina se fue situando el encofrado, que serviría de retenedor para que en el siguiente paso, al aplicar la silicona, esta quedase atrapada y cumpliera así la función de registrar la superficie de la pieza. También fueron situadas las colas de milano, que tienen forma de trapecio, siendo más anchas por la cabeza que por el arranque, que facilitarían posteriormente el encaje entre el molde y el contramolde para realizar el molde correcto de la pieza.





Fig. 418 Encofrado y colas de milanos de ambas piezas. ©María Ávila Rodríguez.

Cuando este paso se dio por finalizado, la pieza se limpió con un hisopo y un poco de alcohol, con el fin de eliminar la grasa de la plastilina y la posible suciedad que hubiese manchado la pieza durante el proceso. Con la pieza completamente limpia y bien situada, se preparó la silicona para realizar la primera y fina capa de registro, que se deja caer directamente sobre la pieza.

Para el proceso se empleó una silicona bicomponente de condensación con una viscosidad de 25000 mPa.s., lo suficientemente baja como para que tuviese una alta capacidad de registro de la textura de la superficie de la pieza. Como agente de curado se empleó un derivado del estaño, con un tiempo de trabajo de 90 a 120 minutos y un tiempo de curado de 24 horas (Santos, 2017a, p.104). Se empleó la silicona de Ferroca S.A., Silical 3481 y su agente de curado 81.

La silicona se pesó junto con su agente de curado para mezclarla en la proporción indicada por el fabricante, 100:5, silicona base: agente de curado.

Una vez obtenida la mezcla, esta fue aplicada sobre las piezas para conseguir la primera capa de silicona, que es líquida para lograr una mayor fidelidad de registro.

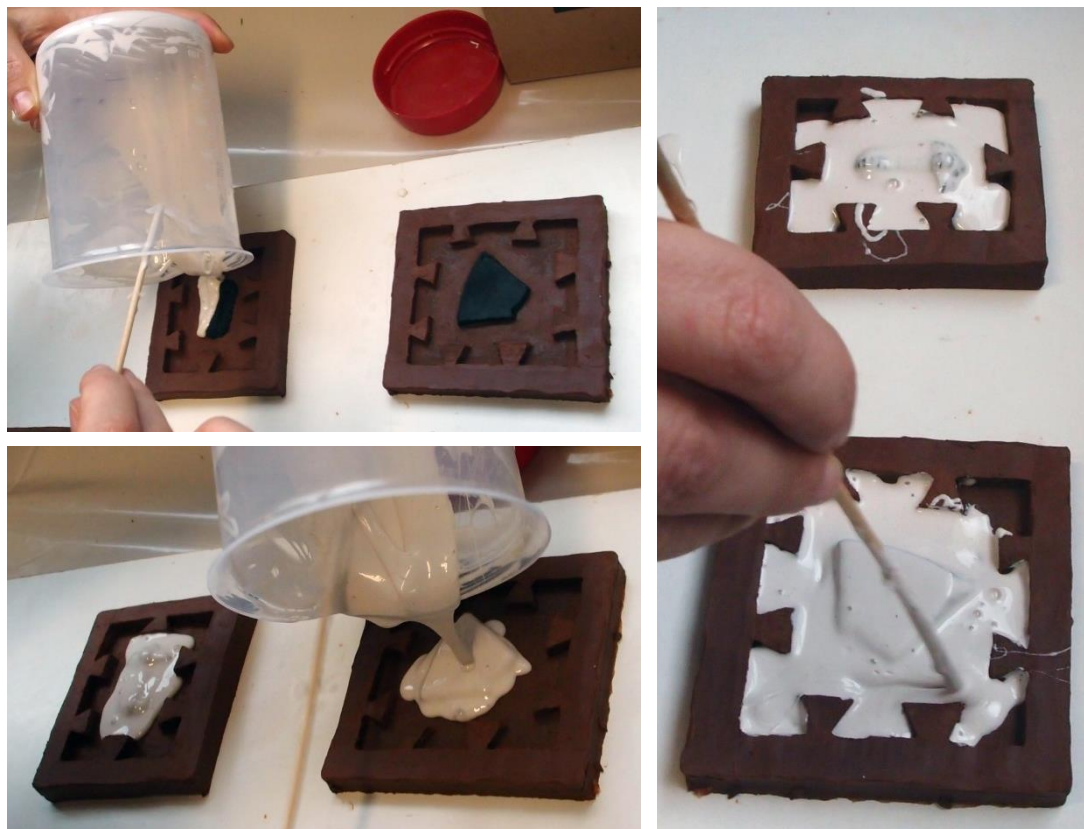


Fig. 419 Aplicando la primera capa de silicona sobre las piezas: a) dejando caer la silicona sobre el *trilobite*; b) dejando caer la silicona sobre la *terra sigillata*; c) con la ayuda de un palillo se repartía la silicona para llegar a todas las esquinas del molde. ©María Ávila Rodríguez.

Se dejó curar esta primera capa 24 horas, tal y como indicaba el fabricante.

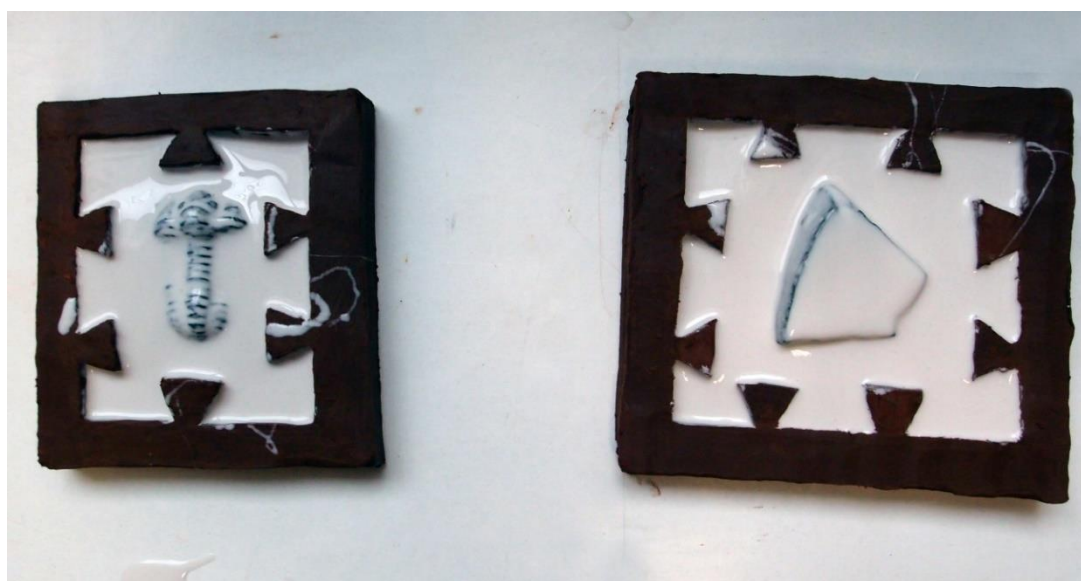


Fig. 420 Silicona de los moldes transcurridas las 24 horas necesarias para su curado. ©María Ávila Rodríguez.

Con la primera capa de silicona ya curada, debía aplicarse una segunda capa para engrosar el molde y que este tuviese 3 o 4 mm de grosor, necesario para que el molde pueda funcionar de manera adecuada. Para ello, esta vez se añadió en la mezcla agente tixotrópico con el fin de aumentar la viscosidad de la mezcla. Para mezclar la silicona con el tixotrópico, se mezcla primero la silicona con el agente de curado y posteriormente se le añade el tixotrópico para que no descuelgue. Con el fin de conseguir que la silicona quedase distribuida uniformemente, y antes de que finalizase el tiempo de trabajo, se empleó un espátulín envuelto en papel mojado, de modo que la silicona no se adhiriese al papel, y se fueron dando ligeros golpecitos sobre la silicona con el fin de aplacarla y conseguir la uniformidad deseada, eliminando las crestas que aparecen al aplicar esta segunda capa. De este modo, la superficie quedó rugosa pero no tan irregular como recién aplicada la silicona, y posteriormente la carcasa de escayola y el molde de silicona tendrían el encaje adecuado.



Fig. 421 Segunda capa de silicona, esta vez con tixotrópico, aplicada sobre la primera. ©María Ávila Rodríguez.

Transcurrido el tiempo de curado, 24 horas nuevamente, la silicona se encontraba lista para ser manipulada sin que su forma cambiase puesto que se encontraba flexible, pero no pegajosa. Se retiraron entonces la barrera de plastilina y las colas de milano, quedando únicamente la silicona que envolvía la pieza y la plancha de plastilina que configuraría el plano de junta para realizar la carcasa.

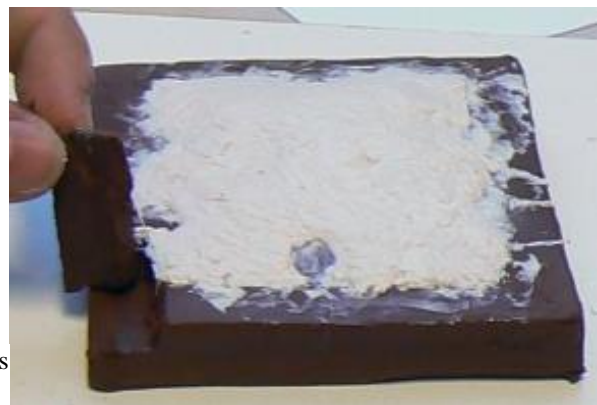


Fig. 422 Retirando la barrera de plastilina y las colas de milano. ©María Ávila Rodríguez.

Con una tijera se terminaron de perfilar las colas de milano para que la escayola con la que se realizaría el contramolde las registrase correctamente.

La carcasa, es decir, el contramolde que sustenta la forma del molde flexible de silicona, fue preparada con escayola. Transcurrido el tiempo de fraguado, esta endureció y fue repasada para darle uniformidad y que presentase

una forma lo más plana posible, de modo que pueda servir de base estable para después realizar el vaciado en resina. Una vez finalizada la primera parte de la carcasa, se dio la vuelta al conjunto y se realizó la segunda parte del molde.



Fig. 423 Recortando con la tijera las colas de milano para que presentaran cortes limpios. ©María Ávila Rodríguez.



Fig. 424 Aplicando la escayola sobre la silicona hasta conseguir la carcasa de la primera parte del molde. ©María Ávila Rodríguez.

Para comenzar con la segunda parte del molde, se dio la vuelta a la carcasa de escayola, dejando al descubierto el otro lado de la pieza. Pudo entonces retirarse toda la plastilina que configuraba el plano de junta puesto que la escayola ya cumplía esta función. Sin embargo, era necesario crear un nuevo encofrado con plastilina para que cumpliera la función de “dique” y de colas de milano.

Cuando la plastilina se encontraba perfectamente situada para crear el nuevo encofrado, se limpió también este lado de la pieza antes de aplicar la silicona. Antes de poner la nueva capa de silicona se aplicó vaselina con un pincel a la primera parte del molde, puesto que la nueva capa de silicona, e incluso la de escayola, podrían quedar para evitar que estas capas nuevas se adhieran a las anteriores.



Fig. 425 Aplicando la vaselina sobre la primera parte del molde para que al poner la nueva silicona no se adhiera a su predecesora. ©María Ávila Rodríguez.

El proceso de la silicona se repitió tal y como se realizó en la otra parte del molde: se aplicó una primera capa de registro, y posteriormente y tras el tiempo de curado, se aplicó la segunda capa con el tixotrópico añadido a la mezcla para que aportase grosor. Una vez la silicona había curado, se retiró toda la plastilina y se retocó la forma de las colas de milano, para conseguir que las piezas tuviesen cortes limpios y sin rebabas causadas por pequeñas filtraciones de la silicona.



Fig. 426 Segunda capa de silicona aplicada en las segundas partes de los moldes. ©María Ávila Rodríguez.

Se realizaron unas llaves semiesféricas sobre esta primera parte de la carcasa de escayola para que encajaran entre sí las dos partes del contramolde

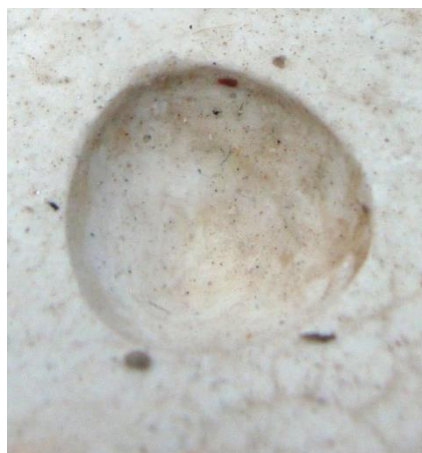


Fig. 427 A la izquierda aparece la llave con la que se realizó la incisión sobre la escayola y a la derecha el hueco resultante. ©María Ávila Rodríguez.

Con las llaves ya preparadas se limpió bien el molde para eliminar los restos de plastilina y escayola que hubiesen podido ensuciarlo y se aplicó nuevamente vaselina por toda la superficie del molde para que las escayolas no quedasen adheridas. Se aplicó entonces la capa de escayola y transcurrido el tiempo de fraguado se repasó para darle la misma uniformidad que presentaba la otra parte del molde.



Fig. 428 Moldes de escayola listos para ser abiertos y realizar el vaciado. ©María Ávila Rodríguez.

Una vez terminado el molde, se abrió y extrajo la pieza del interior del mismo.



Fig. 429 Moldes abiertos. ©María Ávila Rodríguez.

Era entonces el momento de realizar las pruebas previas al vaciado definitivo. Los materiales utilizados para ello fueron: resina epoxídica para laminados, puesto que se trabajaría aplicando la resina en capas y no por colada, bentonita, arcilla espesante de la mezcla que permitiría aplicarla sobre la pared del molde con espátula y pigmentos en polvo escogidos previamente para conseguir los tonos adecuados para cada pieza. Se empleó la resina Epofex EX401, con su endurecedor E416. Para mezclar la resina con el endurecedor se emplearon las proporciones indicadas por el fabricante: 100 partes de A, la resina, con 16 partes de B, el endurecedor. Esta resina presenta un tiempo de trabajo de 27' a 20°C y un tiempo de curado de 24h. Antes de colocar la mezcla sobre el molde, se aplicó con un pincel directamente sobre la silicona pigmento en polvo (terra rossa, terra ombra bruciata, terra ombra naturale, bruno cassel, blanco de titanio, terra verse y rosso posouoli) con el fin de aportar tonalidad a la pieza de un modo más natural en lugar de pintarla directamente, lo que haría que se perdiese gran parte del registro de la silicona, que quedaría oculta bajo la capa de pintura y la reproducción resultaría menos fidedigna. Cuando los pigmentos se aplican en pequeña cantidad sobre la silicona para posteriormente añadir la resina, estos quedan atrapados al endurecer esta, que actúa como aglutinante del color y lo fija.

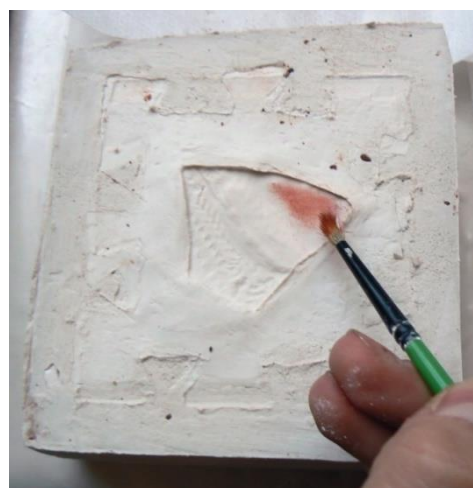


Fig. 430 Aplicación del pigmento en polvo sobre la silicona del molde. ©María Ávila Rodríguez.

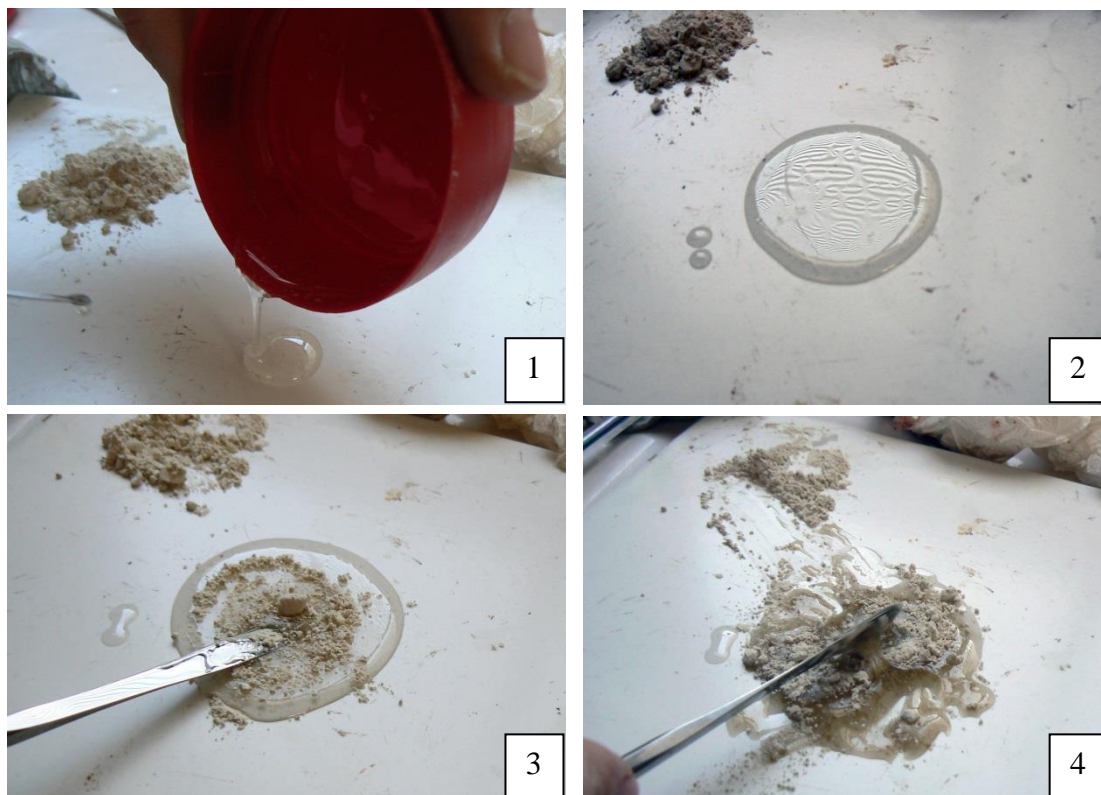


Fig. 431 Preparación de la resina: 1- tras pesar y mezclar la mezcla esta fue colocada sobre la superficie de trabajo, en este caso un azulejo; 2- resina lista para ser mezclada con la bentonita, que aparece arriba a la izquierda, y los pigmentos; 3-resina recibiendo pequeñas cantidades del espesante; 4- resina con más cantidad de espesante. ©María Ávila Rodríguez.



Fig. 432 La mezcla de resina fue dividida en dos mezclas diferentes para las dos piezas a reproducir: la mezcla de la izquierda iría destinada al molde de la *terra sigillata* mientras que la de la derecha se utilizó en el *trilobite*. ©María Ávila Rodríguez.



Fig. 433 A la izquierda las mezclas de resinas y espesante junto a los pigmentos seleccionados estaban terminadas y se comparaban con el color de las piezas originales. A la derecha, la resina era aplicada sobre los moldes del *trilobite* y la *terra sigillata* respectivamente para realizar las pruebas de color. ©María Ávila Rodríguez.

Una vez aplicadas las pruebas sobre el molde, se esperó el tiempo indicado por el fabricante para que la resina endureciese, en este caso 24 horas. Transcurrido ese tiempo, las pruebas podían ser retiradas del molde para ser observadas y valorar si debía extrapolarse la metodología seguida a la realización del vaciado definitivo (Santos, 2017, p.109).

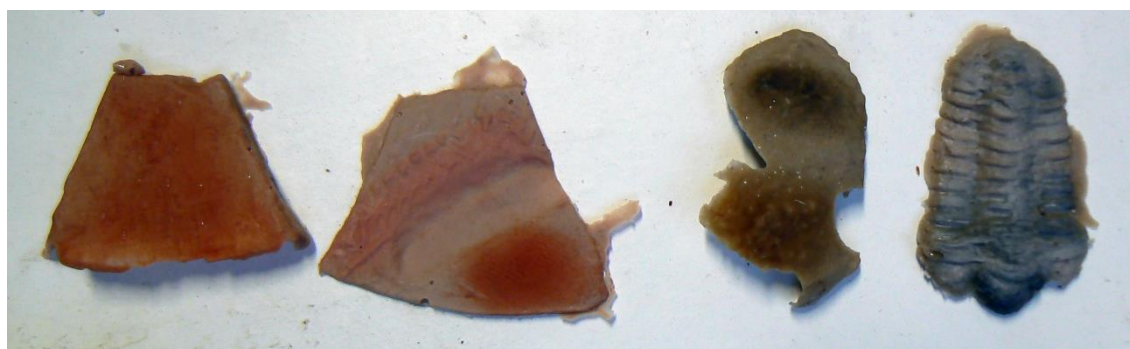


Fig. 434 Pruebas de resina retiradas del molde transcurrida las 24 horas que indica el fabricante. ©María Ávila Rodríguez.

De este modo, gracias a las pruebas realizadas se pudo conocer la cantidad de espesante que necesitaba la resina, los pigmentos que debían emplearse y como debía pintarse la silicona del molde. Así, se procedió a realizar el vaciado definitivo en los moldes.

En primer lugar, se pintaron de nuevo ambos, aplicando los pigmentos directamente en polvo y, posteriormente, se aplicó la resina en ambas partes del molde.

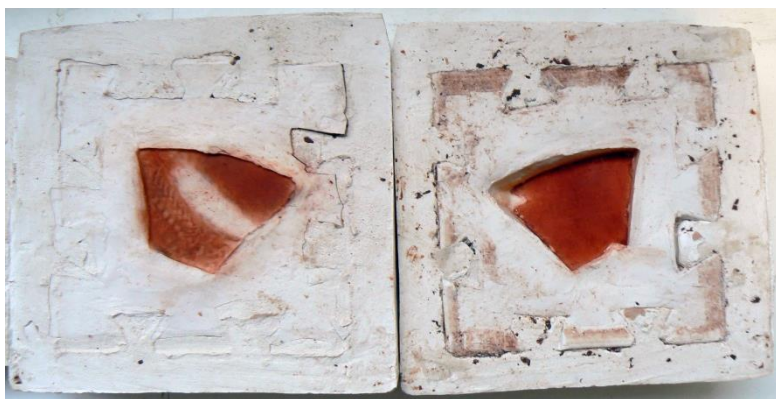


Fig. 435 En la parte superior aparece el molde correspondiente al *trilobite* y el inferior a la *terra sigillata*, ambos pintados y listos para recibir la resina. ©María Ávila Rodríguez.



Fig. 436 Aplicando la resina sobre los moldes. ©María Ávila Rodríguez.

En los laterales de los límites de las piezas se aplicó más mezcla configurándose así un cordón de sellado que por supuesto debía ser del mismo todo que el color empleado para rellenar el molde. Se aplicó además vaselina en la zona de la escayola próxima a la resina, puesto que, si esta desbordaba la silicona, las dos partes de la carcasa quedarían adheridas, lo que dificultaría el proceso de apertura del molde. Cuando el molde se cerró, se presionó con gomas para que la junta de la pieza ajustase lo más correctamente posible.



Fig. 437 A la izquierda aparecen las imágenes del momento en que se le añadía a la mezcla de resina más bentone con el fin de espesarla para, a la derecha, aplicar el cordón en los límites de las piezas. ©María Ávila Rodríguez.

Una vez transcurridas las 24 horas, tiempo de endurecimiento indicado por el fabricante, se abrieron los moldes, se extrajeron las piezas y se eliminó el exceso de resina y las rebabas de la misma a punta de bisturí.



Fig. 438 Una vez abierto el molde, pudo observarse como el exceso de resina se había expandido por la silicona, llegando incluso hasta la escayola. Con la ayuda del bisturí de eliminaron todos los excesos y rebabas de la resina. ©María Ávila Rodríguez.



Fig. 439 Piezas limpias de rebabas de resina. ©María Ávila Rodríguez.

A pesar de que el color había sido aplicado a la pieza en el proceso de realización del vaciado, siempre existen zonas que deben perfeccionarse, como la zona de la junta o detalles concretos. Para retocar los tonos se emplearon colores Gamblin, constituidos por pigmentos y resina urea-aldehído, muy empleados en restauración por su especial estabilidad.



Fig. 440 Retocando ambas piezas con las pinturas Gamblin. ©Sonia Santos Gómez.

Finalizado todo el proceso se pudo comprobar que la reproducción de las piezas se ajusta notablemente a los originales.



Fig. 441 Resultados de los facsímiles. En la parte superior aparecen los originales y en la parte inferior las reproducciones. ©Sonia Santos Gómez.

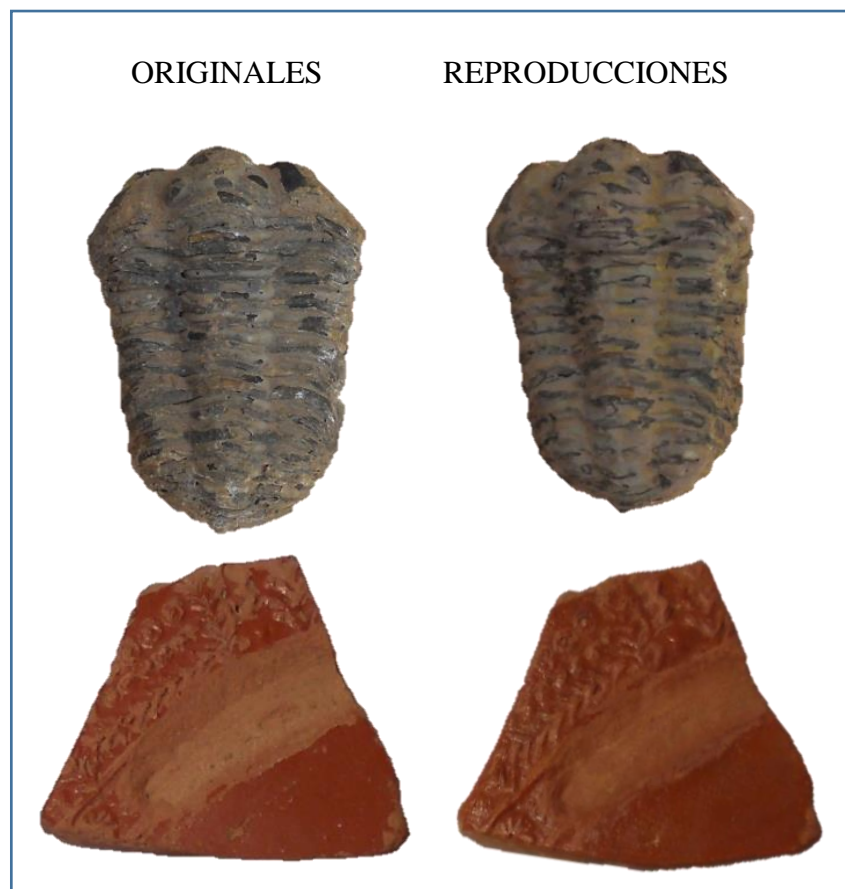


Fig. 442 A la izquierda aparecen las piezas originales y a la derecha los facsímiles ya terminados. ©Sonia Santos Gómez.

9. 2. 1. 1. e El modelo de la vértebra

Debe indicarse que de la vértebra impresa no se realizó reproducción, puesto que para los investigadores únicamente resultaba especialmente importante su morfología, no su coloración y la impresión podría servir en las investigaciones del equipo de la UNED sin necesidad de que sus miembros tuvieran que manipular el original. La vértebra era de gran tamaño y, por tanto, su manipulación resultaba complicada para el grupo investigador.

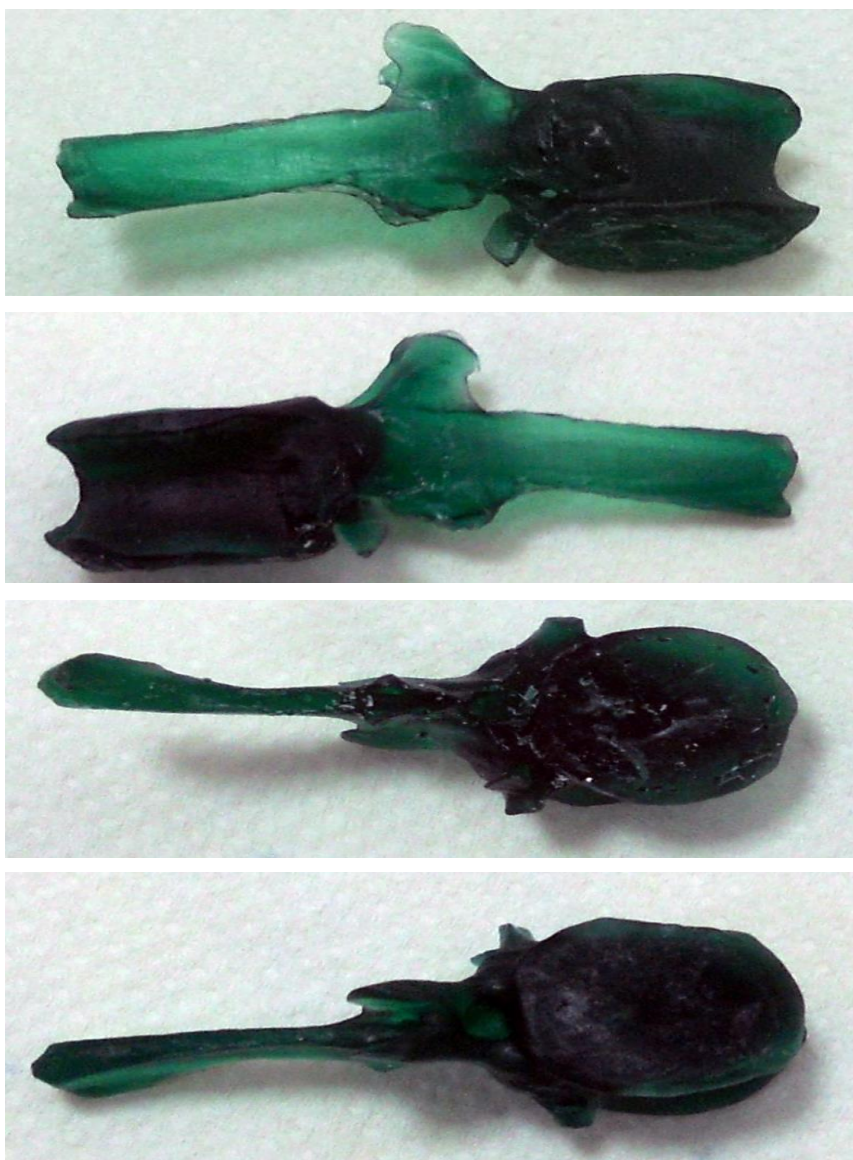


Fig. 443 El modelo de la vértebra impreso y visto desde 4 puntos de vista diferentes. ©Sonia Santos Gómez.

9. 2. 1. 1. f La fundición de la medalla

Por su parte, la impresión de la pieza de Espinel fue enviada a la fundición donde se transformó en plata. Sin embargo, la pieza obtenida en plata presentaba ciertos defectos que podrían subsanarse en un futuro. Estos pequeños defectos se deben a que la fundición no disponía de horno que alcanzase la temperatura necesaria (950°C) para fundir adecuadamente la resina que componía la pieza (Ucm, 2014).



Fig. 444 Fotografía de la medalla obtenida en la fundición a partir de la impresión 3D. Puede verse los defectos de la pieza. ©José Carlos Espinel.

9. 2. 1. 1. g Los vídeos

Una vez finalizadas todas las fases del proyecto, la coordinadora del proyecto editó dos vídeos donde se explica la metodología desarrollada. Los vídeos llevan por título *La utilización de la tecnología 3D en la conservación-restauración de bienes culturales y el ámbito escultórico (PARTE 1)* y *La utilización de la tecnología 3D en la conservación-restauración de bienes culturales y el ámbito escultórico (PARTE 2)* (Santos, 2015a; Santos, 2015b).

En la primera y segunda parte de este vídeo se ha descrito la metodología desarrollada por el equipo investigador de este proyecto y empleada en la reproducción de bienes culturales sin utilizar directamente sobre ellos los materiales habituales de moldeo, con lo que se evita el deterioro o alteración de la obra original durante el proceso. Se detalla la digitalización de las piezas mediante el empleo del escáner 3D, su impresión en resina acrílica con impresora 3D y la realización de los moldes de las impresiones y los vaciados ya a color con resina epoxídica. También se hace referencia a la medalla que ha sido diseñada e impresa para posteriormente ser fundida en plata. De la vértebra, se muestra su impresión.



Fig. 445 Las imágenes hacen referencia a capturas de pantalla de YouTube en las que puede verse la reproducción de ambos vídeos, a la izquierda la parte 1 y a la derecha la parte 2. ©Sonia Santos Gómez.

9. 2. 1. 2 Resultados del proyecto

Antes del proyecto, la Facultad de Bellas Artes ya contaba con un escáner 3D y la impresora necesaria había sido adquirida recientemente, por lo que parte de la cuantía económica solicitada en este proyecto fue destinada a la compra de consumibles (cartuchos de resina para la misma), la adquisición de otros materiales fungibles (espátulas y pigmentos) y la fundición de la pieza en plata.

Como ha podido comprobarse, se plantearon dos casos correspondientes a obra real para los que la tecnología 3D actuó desde el punto de vista de la conservación preventiva. Por una parte, se digitalizó e imprimió un *trilobite*, con el fin de mostrar al alumnado cómo se actuaría en la reproducción de un bien cultural especialmente delicado y sobre el que no es posible realizar directamente un molde tradicional. De este modo el empleo del escáner constituye la mejor opción a la hora de realizar la reproducción, puesto que, al tratarse de una pieza frágil, emplear silicona o cualquier otro material de moldeo podría provocar la alteración de sus valores plásticos como color y brillo. La reproducción de esta pieza tendría como objetivo que pueda investigarse sobre ella sin tener que manipular el fósil original y, reduciendo al mínimo posible las posibilidades de deterioro. Además, la realización de la reproducción tiene fines didácticos, puesto que este puede ser empleado para que los alumnos o el público en general de un museo puedan manipular la pieza sin tocar el original y de modo que este no sufra daños.

Por otra parte, como se ha indicado, se reprodujo un fragmento de una *terra sigillata*, planteando de nuevo su posible utilidad desde el punto de vista didáctico, puesto que la reproducción podría servir para que se pudiera manipular la pieza (su reproducción) sin peligro para el original. En el caso de los fragmentos de piezas arqueológicas y en relación con la *terra sigillata*, la tecnología 3D se emplea también para digitalizar el hueco en una pieza, reproducirlo con la impresora 3D y después realizar su molde y vaciado definitivo con resina, cargas y pigmentos para la reintegración del original.

Por su parte la impresión del fósil de la vértebra caudal media podría servir en las investigaciones del equipo de la UNED (o de otros equipos de investigación) que trabajaba con ella sin necesidad de que sus miembros tuvieran que manipular el original. En este caso, la vértebra era de gran tamaño y, por tanto, su manipulación resultaba más complicada, como

ocurre en muchas otras ocasiones con piezas de este tipo. Tal y como se ha indicado en capítulos anteriores y como se verá también visto con más detalle en próximos casos de estudio, en el ámbito de la Paleontología se está poniendo en práctica la metodología de escanear e imprimir a menor escala las piezas de mayor tamaño, de modo que para los investigadores sea más sencillo manipularlas, tocarlas y colocarlas de modo que se aproximen a como estuvieron dispuestas originalmente. En este caso, no se realizó el vaciado de la pieza impresa, ya que para los investigadores únicamente resultaría especialmente importante la morfología de la pieza, no su coloración y esta metodología de actuación constituyó también un ejemplo para objetivos similares puesto que puede estudiarse la impresión sin tener que manipular el original.

Las tecnologías 3D se utilizaron también en el diseño de la medalla, que después se imprimió con la impresora 3D y finalmente se fundió en plata. Tal y como se ha indicado, el resultado final de la pieza en plata no fue el deseado sin embargo los desperfectos podrían subsanarse o bien imprimir una nueva pieza y repetir el proceso en la fundición modificando la metodología allí empleada.

Además, como ya ha sido explicado, se realizaron pruebas de digitalización en piezas especialmente complejas: un trozo de piel animal con pelo y una pluma. Estos estudios se realizaron con el fin de desarrollar una metodología de trabajo para reintegrar volumétricamente piezas naturalizadas, fruto de las investigaciones para su tesis doctoral llevadas a cabo en ese momento por otra de las integrantes del proyecto, Rita Gil Macarrón (Gil, 2015). Por tanto, se planteó la reintegración de una zona en la que faltaba un fragmento de piel y se pretendía digitalizar una pluma para después imprimirla y realizar el positivo en resina con el fin de contribuir a la reintegración volumétrica de un ave. La metodología que se pensaba llevar a cabo es igual a la expresada en los casos anteriores: Escaneado de la morfología de otro trozo de piel del animal, impresión 3D, realización de moldes y positivos en resina u otros materiales. En ambos casos, la digitalización de las piezas resultó dificultosa y se espera en el futuro poder mejorar los resultados. La textura del pelo o de la pluma dio lugar a que la unión de las mallas generadas durante el escaneado de la pieza resultase deficiente. Se espera, por tanto, mejorar estos últimos resultados mediante la utilización de otros sistemas de digitalización como puede ser la fotogrametría (Santos, 2017a, p.113).

9. 2. 2 Proyecto nº 2: *Aplicación de la tecnología 3D a la conservación de arte contemporáneo como solución al robo y desaparición de fragmentos de esculturas. Estudio de caso: Los Portadores de la Antorcha*

Otro interesante proyecto desarrollado en la UCM y en el que ha participado activamente la autora de la tesis doctoral, constituye el Proyecto de Innovación y Mejora de la Calidad Docente que lleva por nombre *Aplicación de la tecnología 3D a la conservación de arte contemporáneo como solución al robo y desaparición de fragmentos de esculturas. Caso de estudio: Los Portadores de la Antorcha*.

El proyecto hubo de ser desarrollado en dos partes: *Aplicación de la tecnología 3D a la conservación de arte contemporáneo como solución al robo y desaparición de fragmentos de esculturas. Caso de estudio: Los Portadores de la Antorcha*¹³⁸ y su segunda parte *Aplicación de la tecnología 3D a la conservación de bienes culturales como solución al robo y desaparición de fragmentos de esculturas. Caso de estudio: Los Portadores de la Antorcha (Parte II)*¹³⁹, perteneciente el primero de ellos, el nº 171, a la convocatoria del curso académico 2015/2016 mientras que el segundo, el nº194, pertenecía a la convocatoria del curso académico 2016/2017.

El objetivo general del proyecto fue desarrollar una metodología de trabajo que permitiera resolver la problemática de conservación que presenta la escultura pública, debido a su especial susceptibilidad a ser vandalizada, de modo que con cierta frecuencia sus partes débiles son rotas o robadas. Por otra parte, al tratarse de un proyecto de Innovación Educativa, también implicaba instruir en la utilización de las herramientas 3D y sus posibilidades en el ámbito de la conservación-restauración al 1 alumnado del grado Conservación y Restauración del Patrimonio Cultural de la Facultad de Bellas Artes de la UCM.

¹³⁸ Dirección: Sonia Santos, Integrantes: Elena Blanch, Montaña Galán, Margarita San Andrés, Marta Plaza Beltrán, Jorge Rivas López, Pablo de Arriba del Amo, Santiago Tena, Lucio Zurdo, Pedro Ángel Terrón, Rita Gil, José Carlos Espinel Velasco y la autora de la presente tesis.

¹³⁹ Dirección: Sonia Santos, Integrantes: Montaña Galán, Santiago Tena, Lucio Zurdo, Rita Gil y la autora de la presente tesis.

Para la consecución de este primer objetivo general se plantearon los siguientes objetivos específicos (Ucm, 2015):

1. Desarrollo de una metodología de trabajo que diese respuesta a la problemática de conservación de las obras de arte expuestas a la intemperie y con fragmentos o piezas susceptibles de ser robadas.

2. Restauración de la obra *Los Portadores de la Antorcha* (1954), de Anna Vaughn Hyatt Huntington como ejemplo de obra de arte expuesta a la intemperie. Este conjunto escultórico realizado en aluminio está situado en la plaza de Ramón y Cajal, en la Ciudad Universitaria de Madrid, frente a la Facultad de Medicina de la UCM y pertenece al Patrimonio Histórico-Artístico de la UCM (Nº de inventario: CUC001294). En el 2014 la antorcha que portaba una de las figuras integrantes del conjunto se hallaba en paradero desconocido, tras ser robada.

3. Realización de la reproducción de la antorcha y colocación en el lugar donde desapareció la original. Para ello, se propuso la digitalización de la antorcha correspondiente a la versión en bronce de la escultura que se encuentra en la ciudad de Valencia mediante el empleo de un escáner 3D y/o fotogrametría. Después, se planteó realizar la impresión o fresado de la pieza, así como su molde y positivo en resina con cargas y pigmentos ya definitivos, de modo que se pareciera lo más posible a la antorcha de aluminio desaparecida. También se contempló la realización de la fundición de la pieza siempre y cuando el presupuesto del proyecto lo permitiera.

4. Realización un vídeo donde se recogiese la metodología desarrollada.

9. 2. 2. 1 Aplicación de la tecnología 3D a la conservación de arte contemporáneo como solución al robo y desaparición de fragmentos de esculturas. Caso de estudio: Los Portadores de la Antorcha

Hoy en día, la escultura pública es objeto de reiteradas agresiones y puede comúnmente observarse que las obras son cubiertas por grafitis que, en muchos casos, inmediatamente después de su limpieza vuelven a ser aplicados sobre la obra. Por otra parte, la existencia de

puntos débiles en las esculturas permite el robo de fragmentos, especialmente en aquellos elementos en los que la unión al cuerpo principal de la obra resulta insuficiente o débil (Santos et al. 2018, p.62 y 63). Cuando desaparece un elemento importante de obras de arte más tradicional, este habitualmente no es repuesto; sin embargo, cuando se trata de conservación y restauración de arte contemporáneo, normalmente este sí es restituido, especialmente cuando es imprescindible su presencia para la comprensión de la obra y a fin de recuperar su integridad. Estas restituciones también se justifican en base a que se tienen en cuenta los derechos de autor (Autor, 2017; Espín, 1997 citado en Santos et al., 2018, p.62 y 63).

Existen múltiples ejemplos de este tipo de actos vandálicos y numerosas son las intervenciones llevadas a cabo para restituir las partes desaparecidas o dañadas. *Los Portadores de la Antorcha*, inicialmente denominada en Estados Unidos *The Torch Bearers*, constituye uno de esos casos.

La obra, la mayor hasta el momento fundida en aluminio, fue realizada en 1954 por la escultora norteamericana Anna Hyatt Huntington, esposa del fundador de la Hispanic Society of America de Nueva York, como homenaje a la herencia de la civilización occidental. El pedestal de



Fig. 446 Anna Hyatt Huntington trabajando en su estudio en Redding, Connecticut, en la realización de la obra. La fotografía corresponde a 1952 o 1953, no se tiene certeza. ©Marcia Miner.

pedra, sobre el que se levanta la escultura, muestra placas metálicas con inscripciones en inglés y castellano relativas al significado del monumento. El grupo representa a un moribundo que, en su último esfuerzo, entrega la antorcha, símbolo del conocimiento, a un joven jinete que continúa simbólicamente la carrera por el conocimiento que representa la cultura occidental a través de la historia. En 1955 la artista donó la obra a la Villa de Madrid,

y esta fue instalada entonces en su actual emplazamiento, en el centro de la plaza central del campus médico, actual plaza Ramón y Cajal (Uned, n.d b).

El reportaje NO-DO del día 23 de mayo de 1955 titulado *Madrid. Los Portadores de la Antorcha. Donación generosa de una hispanista a la Ciudad Universitaria*, narra como el anterior 15 de mayo se inauguraba el monumento. Además de la propia artista, la entrega estuvo presidida por Carmen Polo, esposa del entonces dictador y jefe de estado Francisco Franco, junto con los Ministros de Educación Nacional, Asuntos Exteriores y Justicia, el Embajador de los Estados Unidos y otras autoridades del momento. En el reportaje se afirma que, al hacer donación de su trabajo, la norteamericana dijo que “España mantuvo la esencia de la civilización occidental trasplantándola a América”. Por su parte, el Embajador expresó lo que la donación implicaba para las relaciones entre norteamericanos y españoles (Rtve, 1955).



Fig. 447 La obra siendo desembalada en la Ciudad Universitaria el 26 de abril de 1955. ©F. Martín Santos Yubero

Más adelante, la antigua plaza de medicina, utilizada para grandes desfiles, misas de campaña y paradas militares, fue perdiendo este carácter simbólico. Sin embargo, en los últimos años de la dictadura y, tras el fin de la misma, el monumento fue testigo de numerosos actos de protesta, manifestaciones y revueltas estudiantiles en la Universidad (Uned, s.f. b).

De este modo la obra fue, desafortunadamente, perdiendo su mensaje inicial y como consecuencia de la historia de España, fue vinculada con el franquismo. Esta interpretación negativa del carácter y simbolismo de la escultura en combinación con el desconocimiento de la historia, así como una gravísima ausencia del respeto por el patrimonio, ha conllevado que determinados sectores de la izquierda la consideren símbolo fascista.



Fig. 448 Estudiantes en el campus el 18 de septiembre de 1962. ©F. Martín Santos Yubero.

Por ello, a lo largo de su historia la obra ha sido objeto de diferentes actos vandálicos en numerosas ocasiones. En la fig. 449 puede observarse el estado en el que la obra se encontraba durante el año 2010, cuando ya entonces profesores y estudiantes pedían al Ayuntamiento de Madrid y al Rectorado de la Complutense que la escultura se limpiase y se contratase un plan de vigilancia con el fin de que no volviese a ser dañada (EuropaPress, 2005).



Fig. 449 Imagen de los Portadores de la Antorcha de la Ciudad Universitaria de Madrid en el 2010. A simple vista puede apreciarse el estado en el que la obra se encontraba. ©Montaña Galán Caballero.

Además de las pintadas, la antorcha ha sido objeto de robo en dos ocasiones. En el año 2011 fue arrancada de la obra, apareciendo poco después, por lo que pudo ser fijada de nuevo con una resina epoxídica (Santos et al., 2018, p.64).



Fig. 450 Hueco que la antorcha dejó en la mano que la soportaba al ser arrancada. ©Montaña Galán Caballero.

Sin embargo, la antorcha desapareció de nuevo en el 2014 y, desafortunadamente, en esta ocasión no apareció (y continúa, aún a día de hoy, en paradero desconocido) por lo que se planteó la reposición de la misma empleando tecnologías por medio del proyecto de innovación y mejora de la calidad docente ya citado.

Así, en junio del 2015, antes de comenzar con el curso académico 2015/2016, en el que se realizó el proyecto, el equipo investigador documentó la mano de la figura que portaba la antorcha. Para ello se contó con la colaboración de Santiago Tena, actualmente profesor del Departamento de Escultura de la UCM con el fin de digitalizar la mano empleando fotogrametría, obteniéndose de este modo no solo una valiosa documentación, sino que también se iniciaba así una aproximación a lo que el proyecto sería pocos meses después.



Fig. 451 En la imagen izquierda (a) aparece una fotografía de la antorcha tomada en el taller de Restauración de Escultura de la Facultad de Bellas Artes cuando esta apareció. ©Carlos Romero Barruete. A su derecha (b) puede observarse la antorcha tras la intervención que la restituyó. ©Montaña Galán Caballero.



Fig. 452 La obra en el 2014, cuando la antorcha fue de nuevo robada. ©Sonia Santos Gómez.



Fig. 453 Sonia Santos y Santiago Tena realizando las fotografías de la mano que portaba la antorcha. ©Sonia Santos Gómez.



Fig. 454 Los resultados que Tena obtuvo fueron altamente satisfactorios. Arriba puede verse la comparativa de la mano de la escultura y su modelo 3D. En la imagen de abajo aparece un montaje con diferentes vistas de la mano digitalizada. ©Santiago Tena.



Una vez llegó septiembre y se inició el proyecto, el equipo tomó la decisión de que la mejor opción para solventar el problema de la desaparición de la antorcha era realizar la reproducción de esta y colocarla en el lugar donde desapareció la original.

Se investigó entonces sobre la existencia de las diferentes réplicas y versiones del conjunto escultórico, a fin de digitalizar alguna de ellas para reproducirla. Existen cinco en Estados Unidos: en la Biblioteca Marc Twain, Detroit (bronce); en el Wardlaw College de la Universidad de Carolina del Sur (bronce); en el Chrysler Museum of Art de Norfolk, Virginia (aluminio); en el Stevens Institute of Technology de Hoboken, New Jersey (aluminio); y en el Discovery Museum de Bridgeport, Connecticut (bronce). Además, existe otra versión en la Habana, Cuba (bronce) y por último en Valencia (bronce), en la rotonda situada entre la conocida Avenida Blasco Ibáñez y la Avenida d'Aragó.

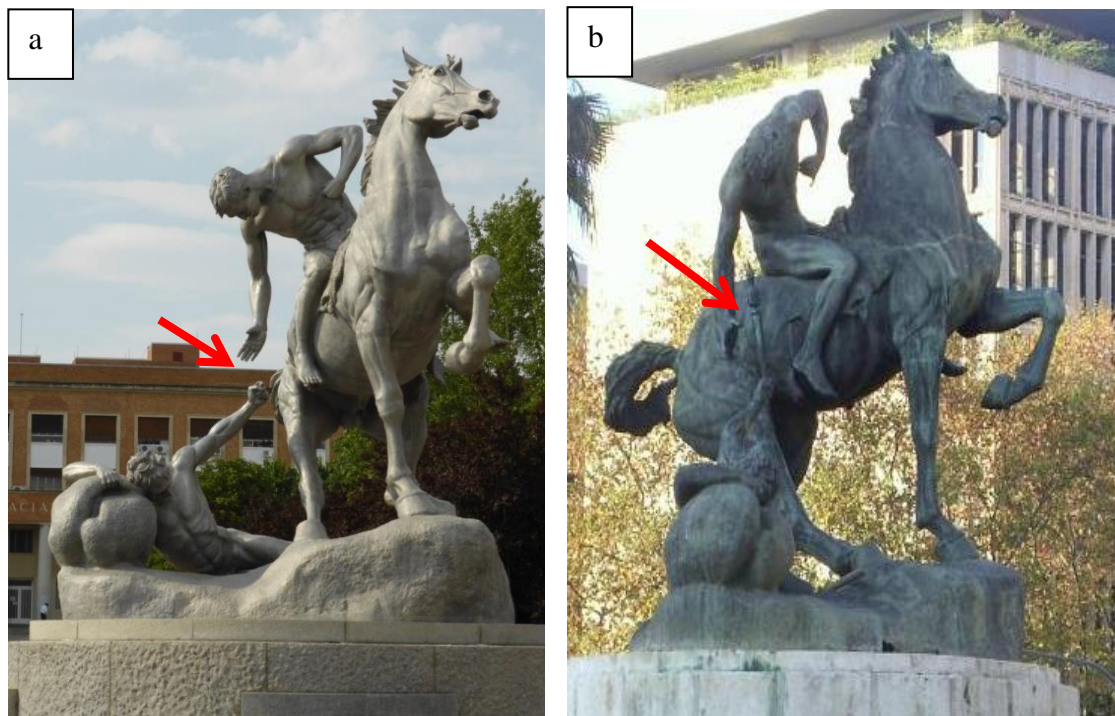


Fig. 455 A la izquierda (a), puede verse la obra de la Ciudad Universitaria de Madrid sin la antorcha; por su parte, en la imagen de la derecha (b) se ve la obra de Valencia, con la antorcha. ©Sonia Santos Gómez.

De este modo, por motivos de cercanía y accesibilidad, el equipo se propuso la digitalización de la antorcha correspondiente a la versión de Valencia mediante el empleo de un escáner 3D (siempre que así fuese posible) y/o fotogrametría. Los datos obtenidos por medio de la digitalización serían impresos o fresados, para posteriormente realizar su molde y positivo en resina con cargas y pigmentos e incluso la fundición de la pieza en metal (Ucm, 2015a).

La versión de *Los Portadores de la Antorcha* situada en la Avda. de Blasco Ibáñez de Valencia está realizada en bronce y pertenece al Ayuntamiento de la ciudad. Elena de las Heras aporta numerosos datos sobre la misma en su tesis doctoral *La Escultura Pública en Valencia. Estudio y Catálogo*. De las Heras detalla que fue en enero de 1964 cuando por mediación del Parque de Maquinaria del Ministerio de Obras Públicas llegaba a Valencia el grupo escultórico *Los Portadores de la Antorcha*. El grupo, fundido en Madrid por don Ignacio Angel González Selles, mide 4,50 m de altura y fue instalado sobre un pedestal de piedra de 1,70 m. de altura y 3,80 m. de diámetro. También esta antorcha desapareció tras su instalación y años después, en 1988, el concejal Rafael Sanchis Perales de Alianza Popular proponía al Ayuntamiento su reposición para que, por fin en 1992, se repusiese de

nuevo la antorcha (De las Heras, 2003, pp.355 y 356). Vicente Galiana, Arquitecto Técnico en el Ayuntamiento de Valencia informó al equipo sobre este hecho en una de sus conversaciones con la coordinadora del proyecto (Santos et al., 2018, p.67).

9. 2. 2. 1. 1 Desarrollo del proyecto

En octubre de 2015, parte del equipo: Sonia Santos Gómez, Montaña Galán Caballero, y la autora de la presente tesis, se trasladaron hasta Valencia contando con la fundamental y altruista colaboración de Luis Gracia Pérez¹⁴⁰, director de la empresa D3D Digitalización 3D, que aportó el escáner para digitalizar la pieza de Valencia. El equipo que Luis utilizó fue un escáner de luz estructurada SLS-2, con una resolución de menos de 0,06mm. Para poder usar el escáner, el equipo investigador hubo de alquilar un generador (Grupo SDMO 2000 inverter) y desplazarse con todo ello a Valencia.

Sin embargo, al analizar la antorcha, el equipo aprecia que el elemento no presenta la misma morfología que la de Ciudad Universitaria. De ello se deduce, bien que ambas antorchas eran diferentes en origen, circunstancia que parece poco probable, bien que la de bronce que sustituyó en 1992 a su original



Fig. 456 Comparativa de ambas antorchas: la imagen de la izquierda (a) muestra la antorcha original. Esta fue documentada por Carlos Romero Barruete, técnico de mantenimiento del taller de restauración de escultura de la Facultad, al reaparecer tras su anterior desaparición en el 2010. ©Carlos Romero Barruete. A la derecha (b) está la antorcha de Valencia. ©María Ávila Rodríguez. Tal y como se aprecia en la comparativa de ambas imágenes, los modelos no presentan la misma morfología.

¹⁴⁰ La autora de la presente tesis se encontraba en octubre de 2015, momento en que el equipo acababa de tomar la decisión de digitalizar la obra mediante un escáner 3D, realizando un curso online teórico-práctico sobre fotogrametría digital y su uso en patrimonio. En la presentación del curso los participantes debían escribir en el foro virtual una introducción de sí mismos y fue entonces cuando se estableció contacto con Luis, que se encontraba también realizando el curso. Se le consultó por el precio de desplazarse con el equipo hasta Valencia para digitalizar la antorcha con su escáner y Luis amablemente se prestó voluntario a colaborar sin cobrar por sus labores desempeñadas, uniéndose al viaje de Valencia.

robada fue realizada inspirándose en esta última, pero sin constituir una copia fidedigna de la original.



Fig. 457 Equipo trabajando *in-situ* en Valencia: a) Sonia Santos y María Ávila llegando al lugar de trabajo con el generador que haría que el escáner funcionase; b) generador alquilado para el trabajo; c) Luis Gracia instalando su escáner encima de la peana del monumento; d) Sonia Santos poniendo en marcha el generador; e) ordenador de Luis Gracia conectado al escáner para manejarlo. ©Montaña Galán Caballero.

Vicente Galiana, el arquitecto técnico acudió entonces a la fundición donde se había realizado el trabajo de restitución de la antorcha tras su desaparición interesándose por la metodología empleada en la realización de la nueva antorcha de bronce, contactando incluso con personal de la fundición que la realizó (Santos et al., 2018, p.67). Desafortunadamente, la fundición que realizó esta nueva antorcha había desaparecido por lo que no se pudieron obtener otros datos.

En ese momento se decidió no emplear el modelo de Valencia para la restitución en la escultura de Madrid puesto que las diferencias morfológicas que presentaban eran muy evidentes. Sin embargo, y dado que el equipo ya se encontraba trabajando en Valencia, se decidió digitalizar esta antorcha con el escáner 3D, puesto que el documento podría servir en un futuro para otras investigaciones, proyectos o para futuras catalogaciones. Desgraciadamente la fuerte luz del día dificultaba que el escáner funcionase correctamente, puesto que los haces de luz proyectados sobre la antorcha no podían ser reconocidos por el lector del equipo, dado que se confundían con la luz solar. Además, la climatología de ese día en el que predominaba un intenso viento, impidió la colocación de los dispositivos y parapetos que el equipo de investigación había llevado a fin de favorecer la digitalización.

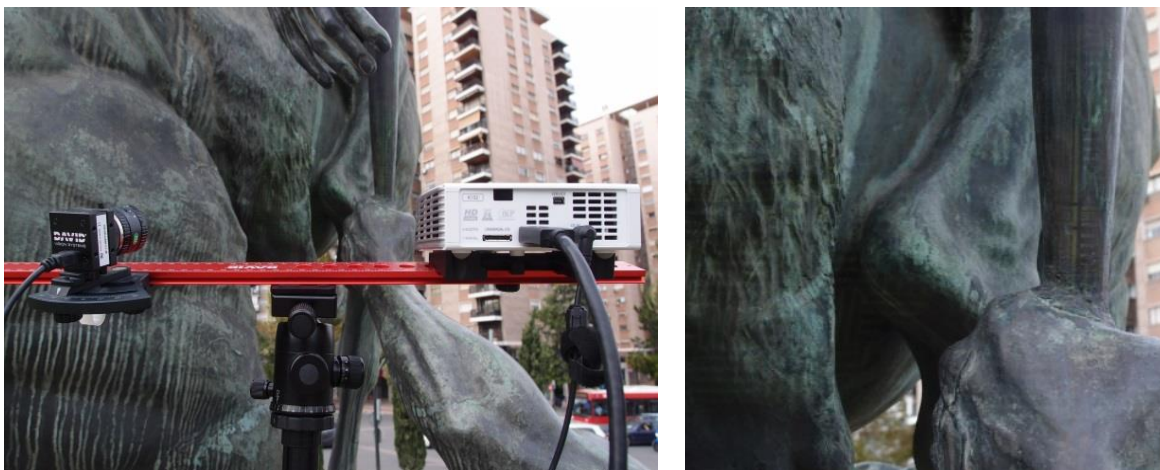


Fig. 458 En la imagen de la izquierda, el escáner estaba instalado para comenzar a escanear la antorcha. A la derecha aparece el escáner proyectando el patrón de luces sobre la parte inferior de la antorcha. Desafortunadamente, puesto que la luz solar era fuerte y el viento impidió la colocación de parapetos para evitar el exceso de luz, la cámara no consiguió realizar registro alguno y no pudo conseguirse digitalizar la antorcha con el escáner. ©Montaña Galán Caballero.



Fig. 459 La imagen muestra a la autora de la presente tesis doctoral realizando las fotografías necesarias para el levantamiento del modelo fotogramétrico. Por su parte, Luis Gracia, de D3D, sostiene un cartón pluma blanco que se coloca como fondo de la antorcha para facilitar la creación del modelo 3D. ©Montaña Galán Caballero.

Se decidió entonces que la mejor opción era digitalizar la pieza mediante fotogrametría, con el fin documentar y realizar el levantamiento de la antorcha. Para ello se realizaron mas de 200 fotografías, puesto que los resultados del levantamiento dependerían directamente de esta fase.

Una vez en Madrid, se seleccionaron las 148 imágenes que se consideraron de mejor calidad para el proyecto y se trabajó en el programa Agisoft PhotoScan. Se importaron todas las fotografías al programa y se alinearon, obteniendose la nube de puntos que conformaba el modelo 3D de la antorcha.

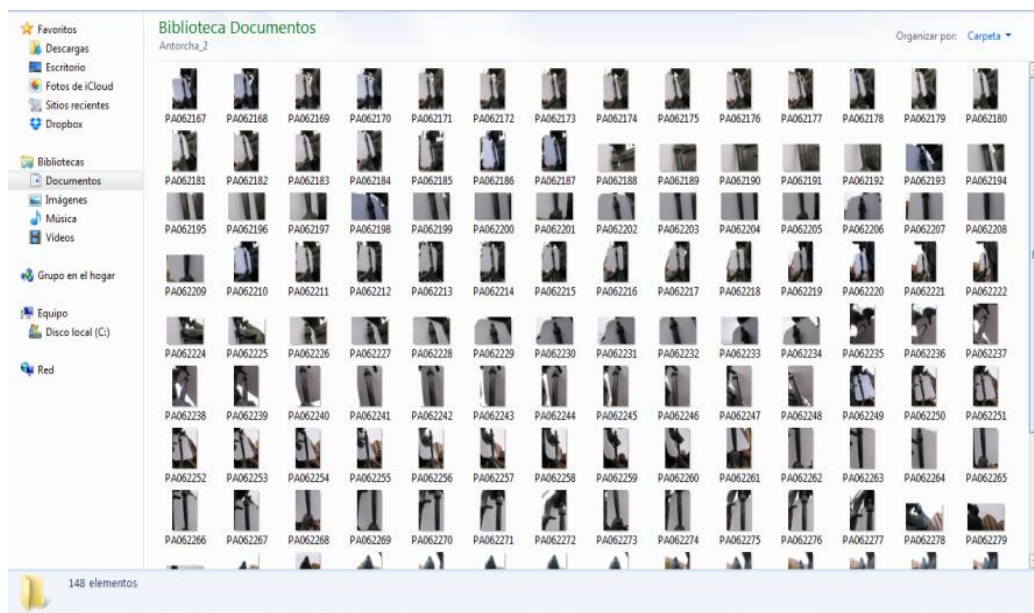


Fig. 460 En la captura de pantalla aparece una muestra de los 148 archivos fotográficos que fueron empleados para levantar el modelo fotogramétrico. ©María Ávila Rodríguez.

Sin embargo, para trabajar con mayor facilidad, puesto que el objeto de la investigación constituía únicamente la antorcha y el resto de elementos del monumento no eran al proyecto relevantes, se eliminaron todos los puntos de la nube que eran ajenos a la antorcha. De este modo, el ordenador hubo de procesar menos información, siendo más rápido y eficaz en la tarea de generar la malla. Cuando la nube de puntos se había limpiado, se procedió a obtener la nube de puntos densa, la malla y por último el modelo texturizado.

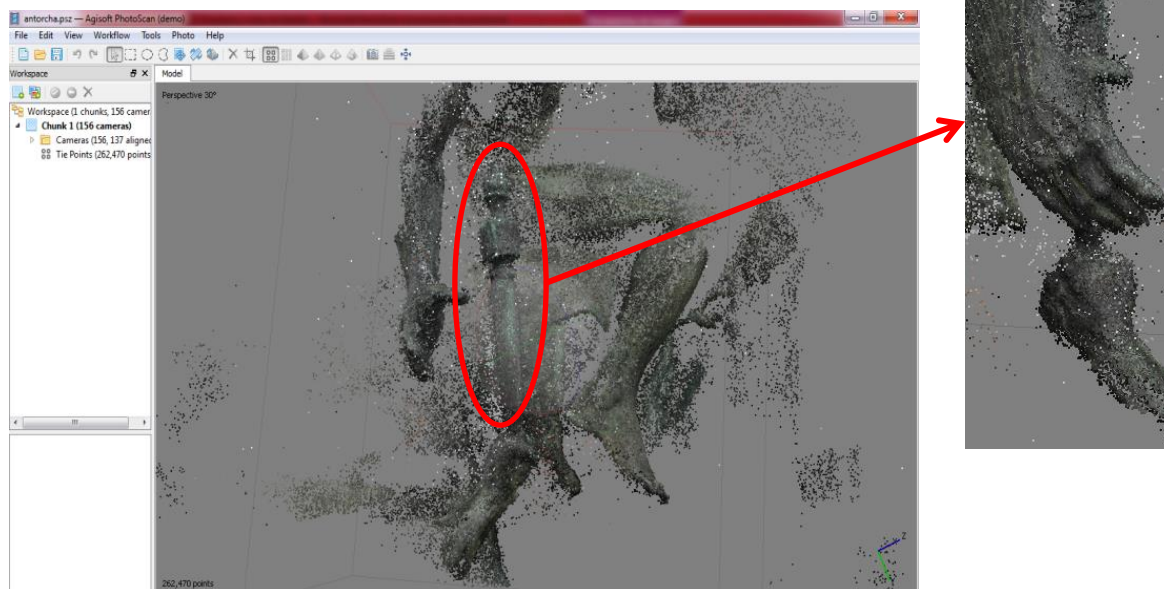


Fig. 461 En el software Agisoft PhotoScan aparece la nube de puntos obtenida tras alinear todas las imágenes incluidas. A la derecha, ampliando y girando ligeramente el modelo, aparece la antorcha. ©María Ávila Rodríguez.



Fig. 462 Modelo fotogramétrico de la antorcha. De izquierda a derecha puede verse la nube de puntos, la nube de puntos densa, la malla y por último el modelo texturizado. ©María Ávila Rodríguez.

Tal y como se indicó anteriormente, existían otras versiones y réplicas del conjunto escultórico, por lo que se decidió investigar sobre estas con el fin de conseguir digitalizar una antorcha idéntica a la de la Ciudad Universitaria. Por motivos económicos y prácticos tuvo que descartarse el desplazamiento hasta ellas y optar en su lugar por pedir colaboración a sus propietarios, con el fin de poder obtener las fotografías necesarias para realizar un levantamiento fotogramétrico.

De todos los organismos consultados, de la directora Beth Dominiani, de la Biblioteca Mark Twain en Connecticut, así como de Sandy O'Reily, miembro temporal de su plantilla, se obtuvieron respuestas muy favorables y el ofrecimiento de realizar y enviar al equipo entre 40-50 fotografías para que se pudiese realizar el levantamiento. Sin embargo, desgraciadamente, tal y como ocurrió con Valencia, se constató que la antorcha de bronce tampoco era igual a la de Madrid. También en este caso podría plantearse si su antorcha fue robada y la actual se realizó de manera aleatoria y poco fidedigna, o si bien si era distinta en origen a las otras dos. De este modo, puesto que existían también importantes diferencias morfológicas con respecto a la antorcha de Ciudad Universitaria, el equipo se vio en la obligación de desestimar el ofrecimiento.



Fig. 463 Antorcha de la Biblioteca Mark Twain de Connecticut. Puede apreciarse que su morfología no se corresponde con la que había en la Ciudad Universitaria de Madrid. ©Sandy O'Reily / Mark Twain Library.

Por otro lado, Melanie Neil, secretaria adjunta del Chrysler Museum of Art de Norfolk, en Virginia, suministró información sobre la escultura y colaboró enviando 15 fotografías de la antorcha. En este caso parecía que la antorcha si era igual que la de Ciudad Universitaria, sin embargo, el número de fotografías enviadas era insuficiente para realizar el levantamiento fotogramétrico.



Fig. 464 Antorcha del Chrysler Museum of Art de Norfolk, Virginia. ©Melanie Neil / Chrysler Museum of Art.

Por último, Stephen Baumann, del Discovery Museum de Bridgeport, de Connecticut, indicó por su parte que la obra había sido vendida a un coleccionista particular, con lo que no pudo suministrar fotografías para el proyecto (Ucm, 2015).



Fig. 465 Los Portadores de la Antorcha del Discovery Museum de Bridgeport, fotografía tomada en el 2011). ©Marcia Miner.

Finalmente, la decana de la Facultad de BBAA y miembro también del proyecto de investigación Elena Blanch se puso en contacto con La Habana, donde existe otra escultura de la cual la antorcha también parece presentar la misma morfología que tiene la de la Ciudad Universitaria. En el caso de La Habana el conjunto escultórico ha sido realizado en bronce. Se realizaron las gestiones oportunas para que se pudieran enviar desde allí 50-60 fotografías para realizar la fotogrametría. El envío de las fotografías estaba previsto para el mes de junio de 2016, sin embargo, las gestiones no avanzaban y, en consecuencia, las fotografías no eran recibidas. Por ello, el equipo de trabajo finalmente optó por otra solución para que la obra no continuara sin la antorcha: realizar una réplica en resina a partir de un modelo de la antorcha modelado en 3D para colocarla en el monumento a la espera de recibir las noticias de La Habana.



Fig. 466 *Los Portadores de la antorcha* de La Habana. ©Ceosgol.

De este modo, en caso de que no pudiera realizarse la fotogrametría con las fotografías de la antorcha de la Habana, se optaría por utilizar este modelado, con lo que la reposición de la antorcha para el conjunto escultórico de Ciudad Universitaria estaría garantizada (Ucm, 2015).

Para realizar esta réplica, la autora de la presente tesis trabajó con diferentes programas de modelado 3D, a fin de obtener el modelo digital más fiel al original posible. Esta opción sólo fue viable dada la existencia de 6 fotografías de la antorcha de aluminio de Ciudad Universitaria que habían sido realizadas en el taller de restauración de escultura de la UCM cuando la antorcha llegó a la Facultad de Bellas Artes en 2011, tras haber sido arrancada de la mano de la figura la porta (Santos et al., 2018, p.68).

Para modelar la antorcha se cargó una de las imágenes en el programa Blender. La fotografía escogida era la que mejor permitía apreciar las características generales de la pieza y, por tanto, facilitar el trabajo. Si hubieran existido fotografías de los perfiles podrían también haberse cargado en el programa e ir de este modo moviendo las vistas en el escritorio 3D para trabajar en diferentes puntos de vista, seleccionando vista frontal, lateral izquierda o lateral derecha, lo cual facilitaría notablemente el trabajo. Sin embargo, dado que las fotografías con las que se contaba no mostraban los perfiles perfectamente alineados, se mantuvieron como material de apoyo durante todo el proceso, puesto que toda documentación se presentaba fundamental.

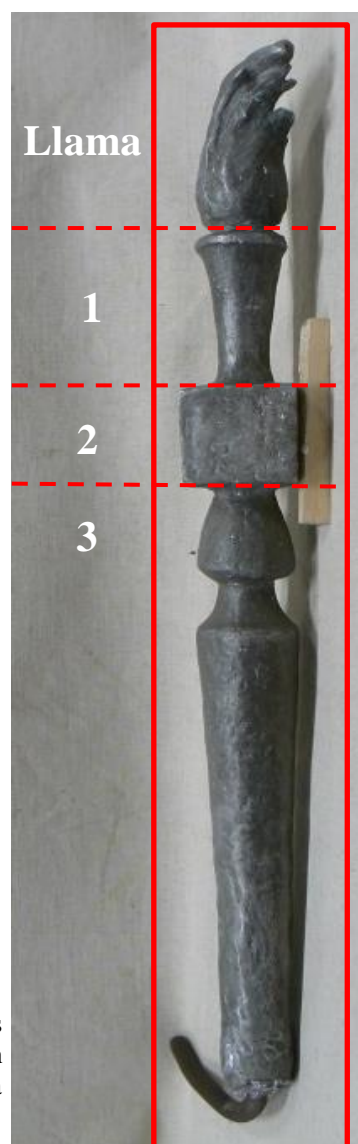


Fig. 467 La antorcha fue modelada de abajo a arriba mediante elementos que conformaron las piezas para obtener el cuerpo total del modelo 3D. En rojo aparecen las divisiones que muestran las 4 piezas que conformaron la antorcha. ©Carlos Romero Barruete.

Con la fotografía escogida, se procedió a crear los elementos que en ella aparecían, levantando así la figura a partir del documento original existente. En primer lugar, se generaron los elementos básicos para avanzar desde lo general a lo particular en la creación del modelo.

Para realizar el cuerpo de la pieza, como no existía una figura geométrica prediseñada que se adaptase a las formas exactas, se dibujó mediante una serie de operaciones el perfil del lado izquierdo de la parte inferior de la antorcha. Cuando este se encontraba perfectamente marcado, seleccionando el modificador “*screw*”, fue generado el cuerpo sobre un eje, por lo que se consiguió obtener la forma necesaria y en bulto redondo.

A continuación, se creó el cubo, que se escaló y situó exactamente encima del cuadrado que la imagen mostraba. Las aristas fueron modificándose para que se ajustasen y encajasen con la imagen original puesto que el cuadrado no era totalmente simétrico, al tratarse de una obra realizada a mano.

Para realizar la última pieza que configuró el cuerpo de la antorcha (3), se repitió la primera operación en la que se trabajó con el perfil y el modificador *screw* para generar la pieza que se situó justo encima de la pieza cuadrada.

Cada elemento iba siendo situado en la posición necesaria trabajando siempre en todas las vistas posibles, desde todos los puntos de vista.

Cuando los 3 elementos que conformaban el cuerpo de la antorcha ya habían sido generados, fue el momento de levantar la llama de la antorcha. Para ello, se creó una esfera que, tal como se hizo con el cubo, se adaptó al tamaño y posición necesarios. Entrando en el modo edición, se seleccionaron determinados puntos de la esfera y fueron modelándose para adaptarla a la forma general de la llama.

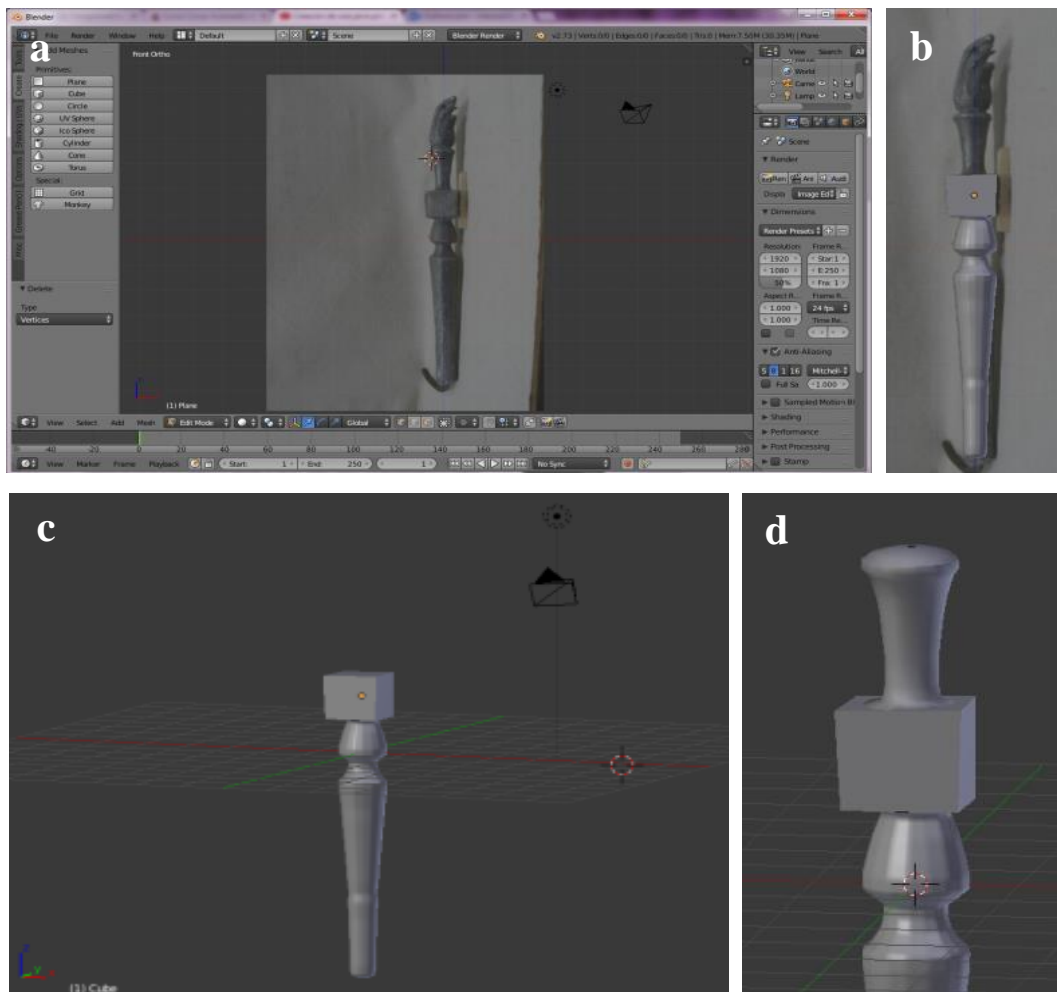


Fig. 468 Creación de los primeros elementos del cuerpo de la antorcha: a) imagen empleada para el modelado importada en Blender; b) imagen con partes del cuerpo de la antorcha ya creados y situados en su posición exacta; c) modelo 3D en el escritorio de Blender. Al no estar seleccionada la vista frontal, la imagen desaparece de la vista y en cambio, puede verse la forma que la antorcha va tomando; d) los 3 elementos que forman el cuerpo ya han sido creados y unidos. ©María Ávila Rodríguez.

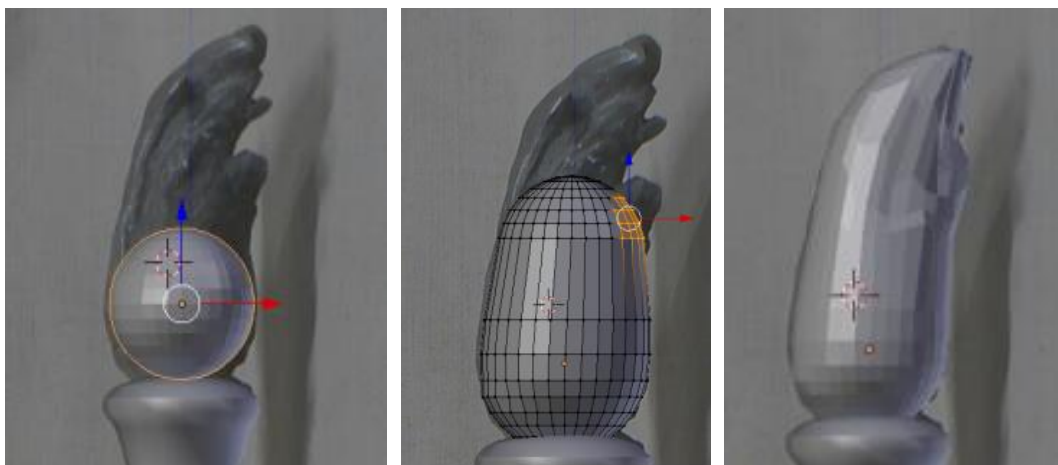


Fig. 469 Proceso de modelado de la antorcha a partir de una esfera: en la primera imagen puede verse la esfera ya escalada y situada en el lugar donde corresponde, en la segunda imagen se estaba trabajando en el modo edición y se habían seleccionado vértices de la esfera, estirándolos hacia arriba, de manera que la esfera se alargara; por último, la modificación de sus vértices consiguió que la llama comenzara a tomar la forma deseada. ©María Ávila Rodríguez.

Con todo el cuerpo general de la antorcha al completo se exportó a otro programa, Geomatic Design X, con el fin de facilitar los siguientes pasos correspondientes al esculpido del modelo. Se suavizaron entonces y se redujeron las caras que formaban la pieza, de modo que no se apreciaran los vértices que conformaban cada elemento.

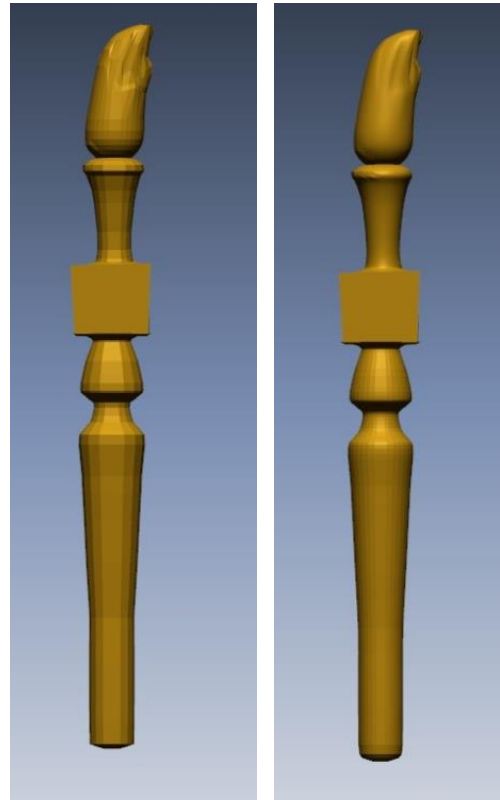


Fig. 470 A la izquierda puede apreciarse el modelo de la antorcha antes de ser modificado. Puede observarse como los elementos eran aún muy geométricos y presentaban un número de caras visible. A la derecha, la antorcha ya había sido retocada y puede apreciarse que todas sus formas habían sido suavizadas. ©María Ávila Rodríguez.

Para trabajar con más facilidad, en el escritorio 3D se situaron el programa de modelado y al lado las fotografías, de modo que se iba cambiando de vista y de imagen según convenía a fin de modelar lo que en la foto aparecía.

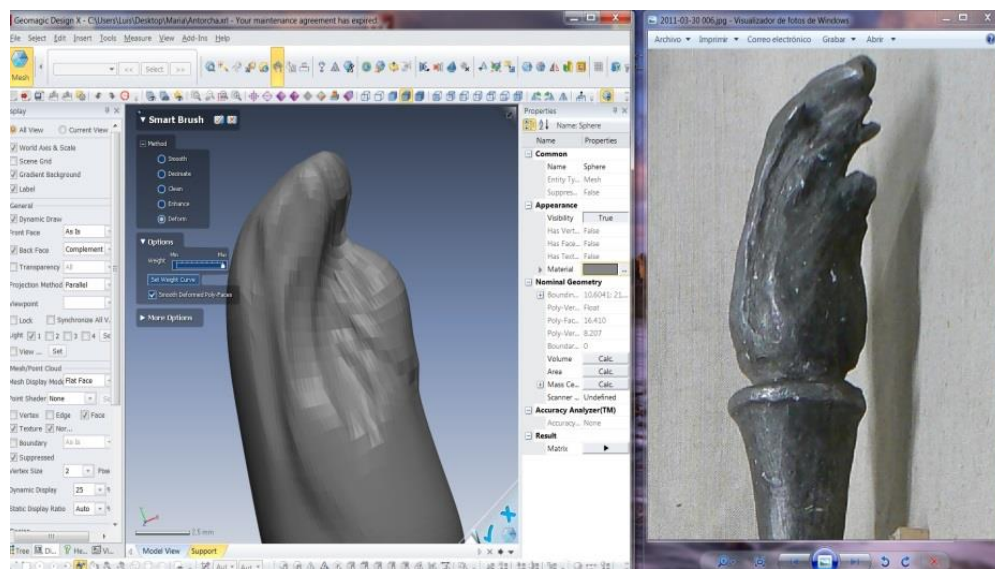


Fig. 471 En la imagen aparece una captura de pantalla del escritorio del PC donde se muestran abiertas dos ventanas para trabajar a la par. A la izquierda la ventana del programa Geomatic Design X, en la cual la llama de la antorcha está tomando forma; y a la derecha la foto de la antorcha ampliada para ir observando donde deben hacerse incisiones o, por el contrario, dar volumen. ©María Ávila Rodríguez.

El modelo fue exportado de nuevo a otro programa, Sculptris, muy útil para modelar en 3D por las herramientas de esculpido que presenta, que son más fáciles de manejar que las de Blender. Las opciones de dibujar sobre la pieza permitieron elevar las crestas y hacer más profundos los huecos de la llama de la antorcha, por lo que la forma de la llama iba adecuándose a la de la antorcha desaparecida.

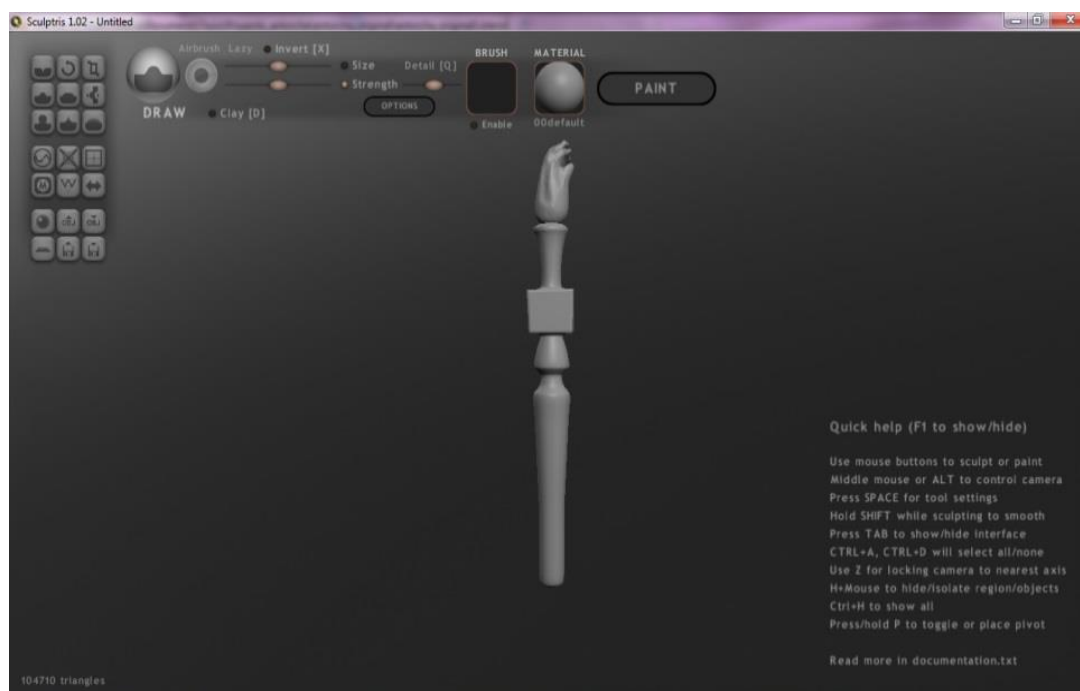


Fig. 472 Antorcha importada en Sculptris. ©María Ávila Rodríguez.

Finalmente se unieron en Blender las 3 partes que conformaban la antorcha en Blender. A cada una de las piezas se le asignó un tono con el fin de facilitar su unión y ver más claramene la zona de junta: la llama mantuvo el color predeterminado de las piezas creadas en Blender, gris, la siguiente pieza aparece en blanco y la última, el cuerpo de la antorcha, en dorado.

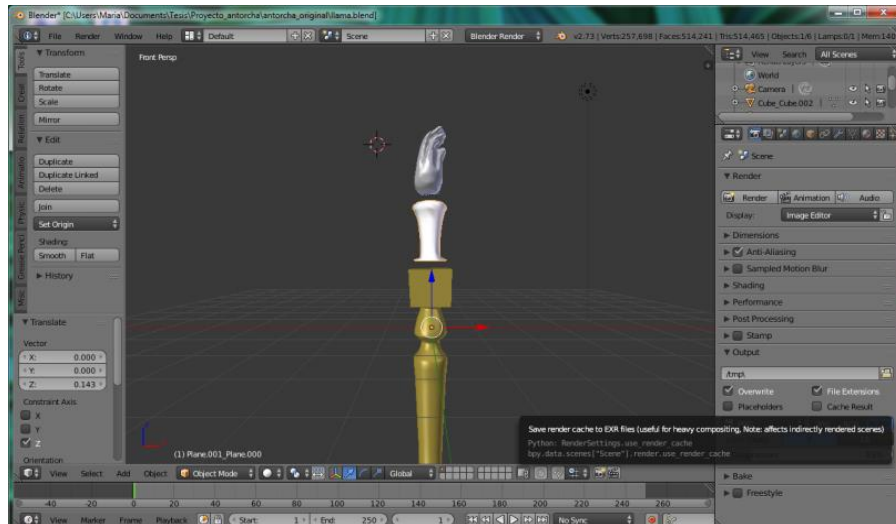


Fig. 473 En la imagen puede verse el escritorio de Blender en el que aparecen los 3 .obj que conformarían la antorcha. ©María Ávila Rodríguez.

Para unir estos tres archivos .obj se cargó de nuevo la foto empleada en el inicio del proceso con el fin de asegurar que cada elemento se encontraba en la posición exacta que le correspondía.

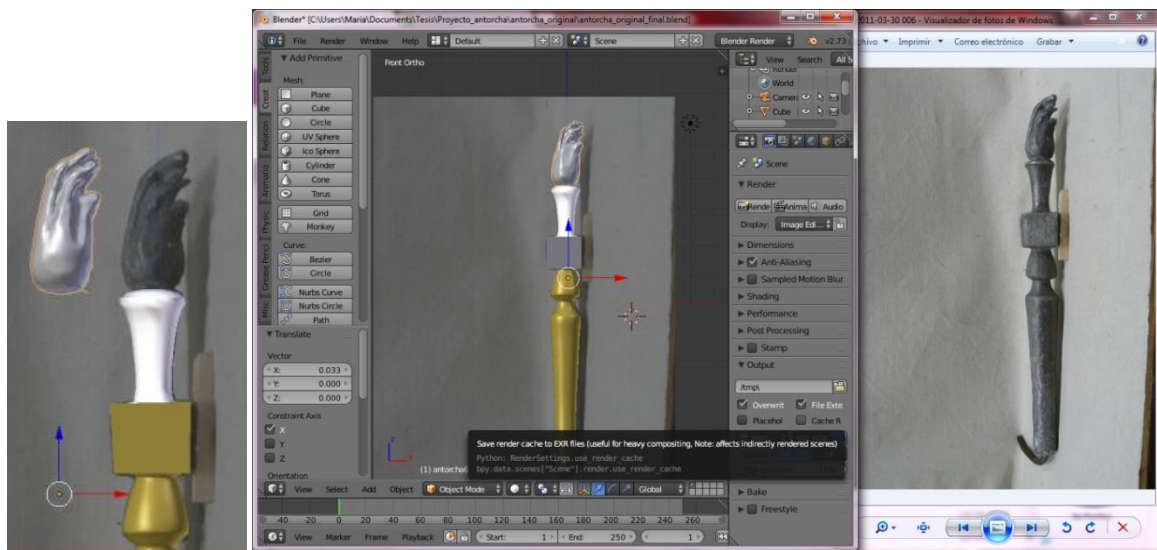


Fig. 474 En la imagen de la izquierda puede observarse el momento en que la llama iba a ser situada en su posición exacta. Por su parte, a la derecha puede verse el escritorio de trabajo en el cual se tenía a abierto el programa Blender, con la foto cargada de fondo y la antorcha terminando de ser situada en su posición adecuada, momentos antes de unir los 3 elementos para que formasen un solo modelo. A la derecha, la misma fotografía, abierta en el “visualizador de fotos de Windows” para no perder las referencias en ningún momento. ©María Ávila Rodríguez.

Una vez el modelo de la antorcha hubo sido completado, surgió la incógnita sobre cómo podrían conocerse las medidas de la antorcha para que la impresión tuviera el tamaño exacto del original. Conociendo la medida total del monumento, a partir de una fotografía

en la que se conservase la antorcha, era posible hacer un cálculo con el que se obtuviese la media de la antorcha. Sin embargo, surgió un modo más exacto y sencillo de conseguir el objetivo: en la fotografía tomada en el taller de la vista derecha de la antorcha, esta aparecía apoyada sobre una caja de tabaco de liar que sirvió para elevarla y conseguir que la antorcha pudiera ser observada mejor. Esta caja, precisamente, pudo servir para deducir la medida exacta de la antorcha. Así, la antorcha quedaría, por consiguiente, escalada conforme a las proporciones de la caja.

Sin embargo, como en la foto la antorcha aparecía en diagonal, el primer paso fue editar la foto de modo que la antorcha quedase colocada recta y verticalmente.

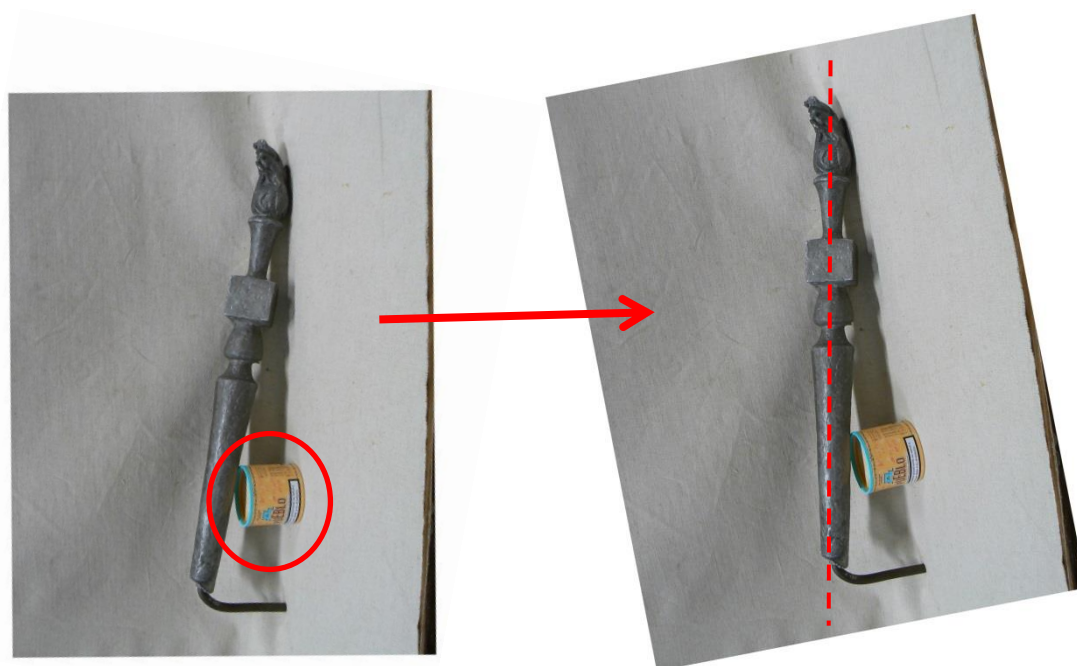


Fig. 475 La imagen de la izquierda es la fotografía original en la que aparece la antorcha apoyada en la caja de tabaco mientras que a la derecha la fotografía había sido girada y la antorcha quedaba de este modo correctamente situada. ©Carlos Romero Barruet.

Para conseguir escalar la antorcha, se importó la fotografía en la que aparece la caja de tabaco al escenario de Blender, haciendo coincidir la posición y el tamaño del modelo con la imagen. Cuando se tuvo bien situada la imagen y el modelo, se creó y editó un cilindro que encajase en el ancho y el alto de la caja de tabaco. Una vez se había conseguido el encaje, se le asignó al cilindro las medidas reales de la caja de tabaco. De este modo, la fotografía se escaló, ampliandola hasta conseguir que encajase perfectamente con el cubo, ya con sus

medidas de la caja de tabaco reales. Finalmente la antorcha fue también ampliada hasta encontrar el tamaño exacto con la fotografía.

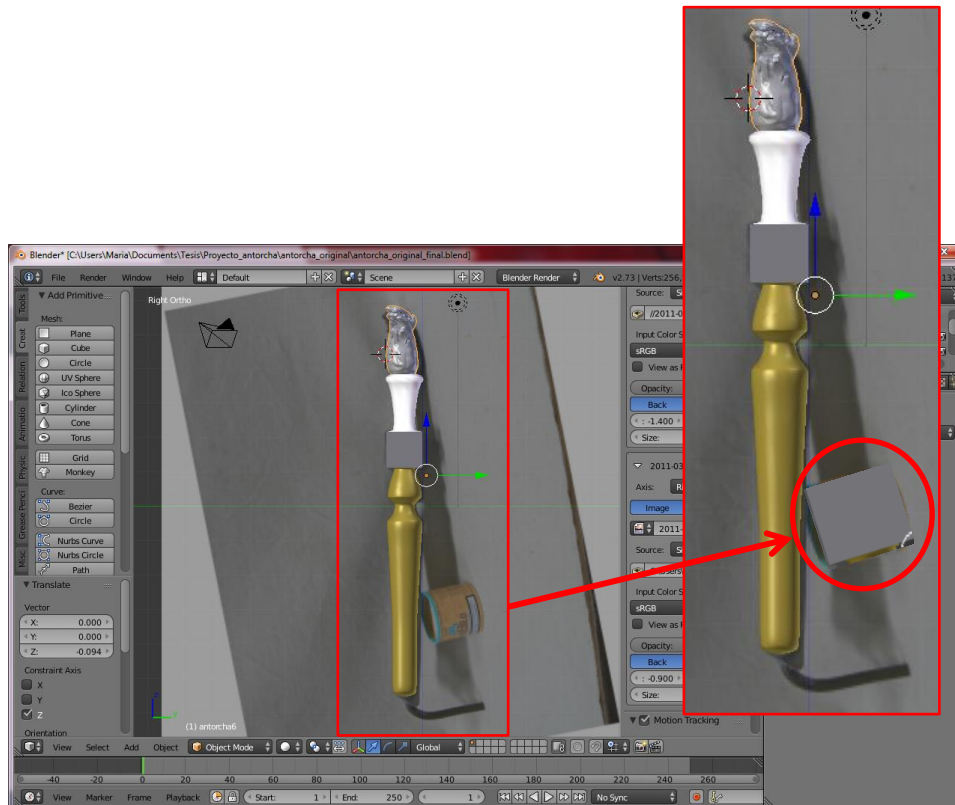


Fig. 476 En la imagen puede observarse el modelo de la antorcha situado encima de la foto en Blender. A la derecha aparece ampliada la misma imagen, pero en la caja de tabaco ya se había posicionado el cilindro (señalado dentro del círculo rojo) que serviría para obtener las medidas de la antorcha. ©María Ávila Rodríguez.

Como último paso, se cargó en Sculpttris el nuevo archivo en .obj para terminar de retocar la pieza.

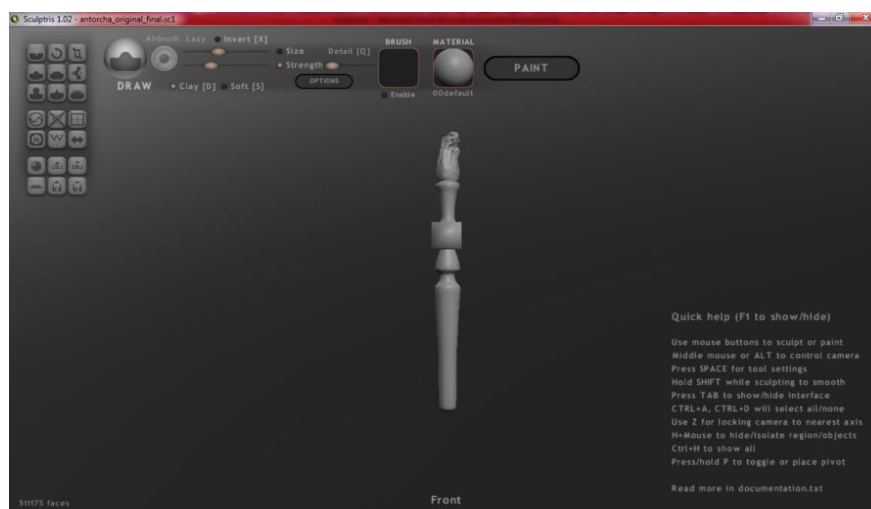


Fig. 477 Modelo de la antorcha final en Sculpttris. ©María Ávila Rodríguez.

Como el modelo previo al bronce, realizado por Anna Hyatt Huntington era de barro, las marcas de los dedos y las herramientas de trabajo quedaron registradas sobre este, aportando a la pieza la textura característica de una obra realizada de esta manera y sobre este material. Para aplicar esta textura al modelo virtual ya realizado, se ejecutaron algunas pruebas, realizando incisiones y marcas virtuales. Sin embargo, finalmente se decidió dejar el archivo sin texturizar y realizar esta fase a posteriori, manualmente, sobre el modelo ya fresado o impreso, para que se asemejara más al original.

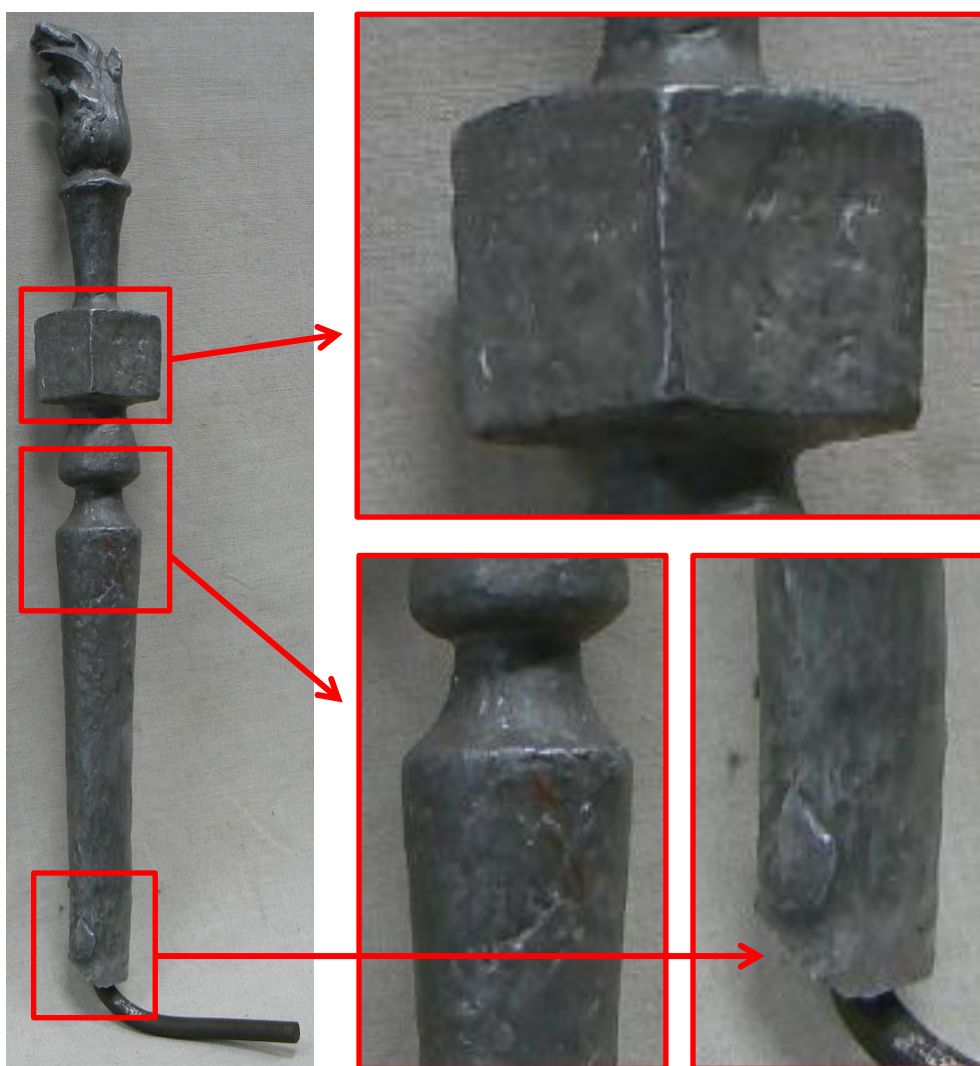


Fig. 478 A la izquierda la imagen de la antorcha original de Ciudad Universitaria. ©Carlos Romero Barruet. A la derecha aparecen determinadas partes ampliadas para que se aprecien los detalles de las marcas en las que puede verse claramente que la obra se hizo a mano. Las aristas del cubo no son rectas y a lo largo de toda la pieza se ven marcas del trabajo.

Una vez se disponía del modelo 3D este podía ser materializado, empleando dos equipos disponibles: una impresora 3D y una fresadora.

Se imprimió la llama con una impresora 3D modelo Prusa i3, utilizando PLA como material de impresión: altura de capa 0.2 mm, relleno: retícula de al 10%, 14 m de filamento de 1,75mm. El tiempo que tardó la impresora en imprimir la antorcha fue de 4h 54minutos (Ucm, 2015).



Fig. 479 Las imágenes superiores muestran la impresora Prusa i3 imprimiendo la antorcha y en la imagen inferior puede verse la llama impresa. ©Pablo de Arriba del Amo.

Sin embargo, dado que la estratificación era apreciable en el modelo, se optó finalmente por su fresado.

Para ello se empleó una fresadora CNC de la marca Roland, modelo MODELA PRO MDX-650. Este equipo tiene tres ejes con servomotores con un volumen máximo de trabajo de 650 mm (X) x 450 mm (Y) x 155 mm (Z). La MDX-650 puede trabajar una amplia variedad de materiales, como las resinas de poliéster, poliuretano, epoxi, acrílicas (PMMA), madera, piedras blandas. En este caso se utilizaron bloques de una resina tipo poliuretano marca Necuron®, bloques a base de resina de poliuretano. Las fresas que se aplicaron eran de acero y presentaban distintas formas y diámetros por lo que, según el tipo de trabajo a realizar, se utilizaron para desbastar o bien realizar el acabado de la superficie. El software que utiliza la fresadora es específico de la misma y se denomina Roland Modela Player 4. Este programa es una aplicación de software CAM que acepta archivos iges, dxf y archivos .stl exportados de los programas más populares de software CAD 3D industrial. Se utiliza para generar escalado proporcional 3D, identificar la dirección de fresado y para mostrar la trayectoria de la herramienta (Santos et al., 2018, p.69).

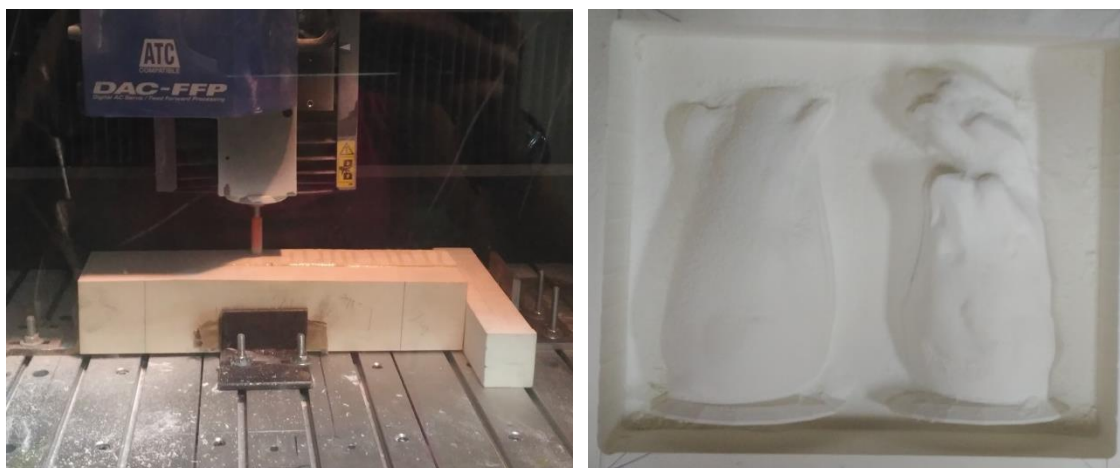


Fig. 480 A la izquierda aparece la fresadora CNC trabajando en la materialización de la llama y a la derecha el resultado del fresado. ©María Ávila Rodríguez.

La fresadora desbasta los patrones establecidos por el software en plano, por lo que no puede trabajar en bulto redondo. Por ello, el volumen de la llama se configuró en un relieve constituido por dos mitades, es decir dos caras. Una vez la llama estuvo lista, se recortó el material sobrante con ayuda de máquinas de corte de madera y las dos partes fueron unidas entre sí. Se recortaron entonces los restos que quedaban del material sobrante que no formaba parte de su morfología.

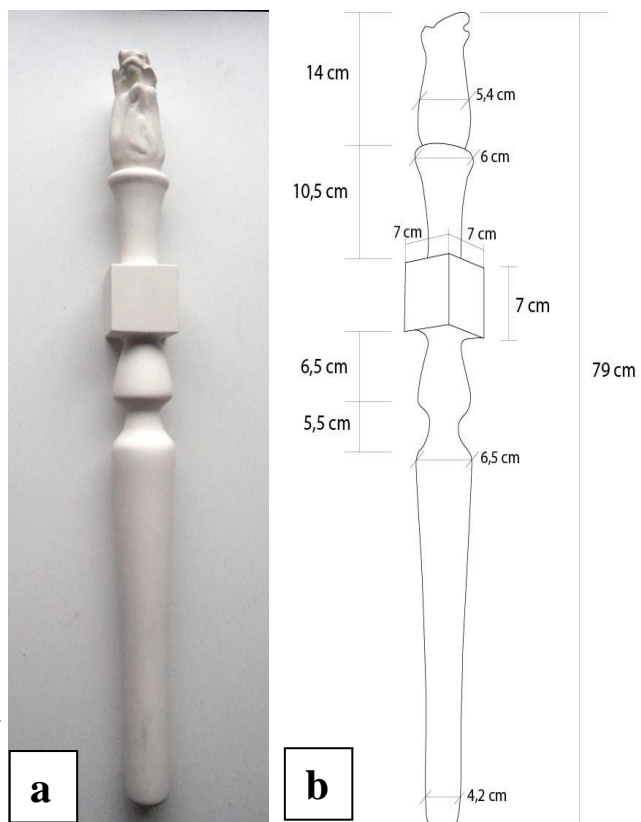
En este punto se dio por finalizada la primera parte del proyecto, puesto que el curso académico había cesado y no quedaba tiempo para más. Sin embargo, dado que los objetivos aún no se habían cumplido puesto que la antorcha no había sido restituida, el equipo investigador solicita un nuevo proyecto para completar los objetivos planteados. Se planteó que la cuantía económica solicitada podría servir para incentivar al personal dedicado a realizar las fotografías de la Habana y, si fuera posible, realizar la antorcha en aluminio.

9. 2. 2. 2 Aplicación de la tecnología 3D a la conservación de arte contemporáneo como solución al robo y desaparición de fragmentos de esculturas. Caso de estudio: Los Portadores de la Antorcha (Parte II).

En la convocatoria del curso académico 2016/2017, con el objetivo de cumplir los objetivos en el primer proyecto planteados (Ucm, 2017a), se abordó este nuevo proyecto (nº194) partiendo desde el punto en que había finalizado su predecesor (nº171): con la impresión de la llama. En este proceso, quedaba imprimir el cuerpo, que finalmente fue torneado puesto que se trata de un cuerpo de volúmenes muy geométricos.

Cuando llama y cuerpo de la antorcha estuvieron configurados, se adhirieron empleando resina de poliuretano.

Fig. 481 A la izquierda la antorcha completa: llama y cuerpo han sido adheridos. ©Sonia Santos Gómez. A la derecha, el esquema de las medidas de la antorcha ©Guillermo Quirós Carretero.



9. 2. 2. 2. 1 Desarrollo del proyecto

Antes de avanzar con el proceso y vaciar la pieza, debía tenerse la certeza de que el tamaño y la morfología de la pieza era los adecuados. De este modo la antorcha fue llevada a la escultura y fue situada manualmente en su posición, con el fin de determinar si la restitución era fiel a la composición de la obra, valorándola tanto individualmente como en su conjunto. Se dio por positivo el resultado y de este modo se pudo continuar con los siguientes pasos.



Fig. 482 Sujetando la antorcha en el lugar y la posición correcta, con el fin de valorar los resultados obtenidos. ©SoniaSantos Gómez.

Con la seguridad de que la pieza presentaba el tamaño y formas necesarios, se procedió a aplicarle de manera manual la textura precisa, empleando para ello escofinas de diferentes gramajes y tamaños, así como un microtorno que agilizase el proceso y con el que obtener incisiones y marcas más profundas. Se empleó una Dremel convencional con diferentes cabezales, a fin de conseguir unos resultados más cercanos a la antorcha original.

Concluído este proceso, el modelo en resina de poliuretano presentaba una morfología idónea, aunque aún no se le había aplicado su color definitivo, por lo que comenzó la fase consistente en la realización su molde para obtener un vaciado que fuese del tono y color necesarios.



Fig. 483 En ambas parejas de fotografías se muestra a la izquierda la pieza antes de ser retocada con el microtorno, mientras que a su derecha puede verse su aspecto tras el retoque. Claramente se aprecia como la textura de la obra ha cambiado totalmente e imita a la de la antorcha original. ©María Ávila Rodríguez.

El primer paso fue, antes de comenzar con el molde de la antorcha, situar una pieza que constituyese el hueco del perno o espiga que sería colocado posteriormente en el modelo definitivo para mejorar la fijación entre pieza y escultura. Para ello, fue realizado un orificio en el modelo, mediante el empleo de un taladro. Posteriormente se introdujo una barra de fibra de vidrio en su interior, adherida con una resina epoxídica en su interior (Araldite® Rápido).

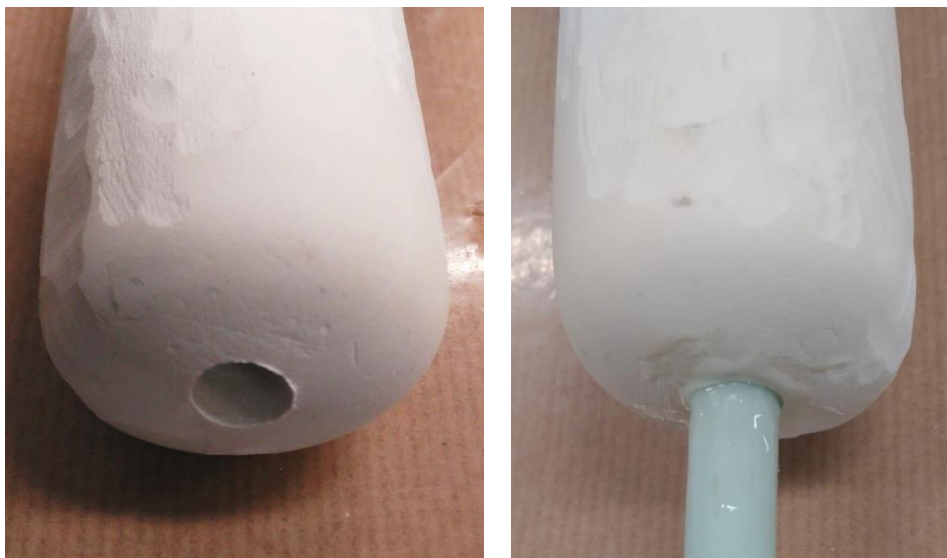


Fig. 484 A la izquierda aparece el orificio realizado en el extremo de la pieza, mientras que a la derecha la espiga ya había sido colocada en su posición con el adhesivo. ©María Ávila Rodríguez.

Dadas las características de la pieza, se planteó la realización de su molde en dos partes, constituido por la cara anterior y posterior de la antorcha.

Los pasos a seguir, a continuación, desarrollados en detalle, fueron los siguientes:

1. Molde de silicona.
2. Carcasa de escayola.
3. Pruebas de resina.
4. Vaciado.
5. Repaso del vaciado.

El primer paso para la realización del molde era construir su plano de junta en el modelo fresado. Para ello, se rodeó la antorcha con barro por todos sus lados. A continuación, se alisó la superficie con una espátula a la vez que se iban sellando los límites

entre la pieza y la plancha, para impedir así que la silicona que posteriormente se aplicaría se introdujera a través de esos huecos. El barro no podía dejarse secar, por lo que, al terminar cada jornada de trabajo, este debía humedecerse correctamente y taparse con un fino plástico por completo, de modo que no existiese ningún hueco que dejase pasar el aire y secase el barro.



Fig. 485 La antorcha con su cama de barro lista para configurar el plano de junta del molde. ©María Ávila Rodríguez.

El encofrado serviría de retenedor para que, en el siguiente paso, que consistía en aplicar la primera capa de silicona, esta quedase atrapada y no escapase a fin de registrar correctamente la pieza. Fueron entonces colocadas las colas de milano que facilitarían posteriormente el encaje entre el molde y el contramolde.



Fig. 486 Colas de milano de la primera parte del molde. ©María Ávila Rodríguez.



Fig. 487 Encofrado y las colas de milano rodeando toda la antorcha. En la parte superior de la antorcha, a la izquierda en la fotografía, puede verse los tablones de madera que se situaron para asegurar que la superficie del molde era estable. ©María Ávila Rodríguez.

Cuando este paso se dio por finalizado, la pieza fue limpiada con un hisopo y etanol, a fin de eliminar los restos de barro que quedaban en la pieza durante el proceso, sobre todo aquellos que podían alterar el registro de la pieza con la silicona. Así, con la pieza limpia, se preparó la silicona para realizar la primera y fina capa de registro, que se dejó caer directamente sobre la pieza. La silicona fue aplicada únicamente en el eje central de la pieza, puesto que, por la propia morfología de esta, iría descolgándose y adaptándose a las curvas. Solo fue aplicada directamente e incidiendo con un palillo en las zonas existentes entre los límites de la base de barro y la antorcha, puesto que constituían profundos recovecos a los cuales la silicona no iba a acceder correctamente descolgándose por sí misma.

Para el proceso se empleó una silicona bicomponente de condensación (Silastic 3481), con una viscosidad de 25000 mPa.s. lo suficientemente baja como para que tuviese una alta capacidad de registro de la textura de la superficie de la pieza. Como agente de curado se empleó un derivado del estaño, con un tiempo de trabajo de 90 a 120 minutos y un tiempo de curado de 24 horas (agente de curado 81) (Santos, 2017a, p.104). Ambos componentes han de ser pesados y mezclados en la proporción indicada por el fabricante, 100:5, silicona base: agente de curado.



Fig. 488 A la izquierda aplicando la primera capa de silicona, es decir la capa de registro. A la derecha la silicona ya aplicada. ©María Ávila Rodríguez.

Se dejó curar esta primera capa y se aplicó una segunda para engrosar el molde, a fin de que tuviera un grosor de 3 o 4 mm. Para configurar esta segunda capa se empleó, además del agente de curado y la silicona base, un agente tixotrópico, con el fin de aumentar la viscosidad de la mezcla. Para conseguir que la silicona quedase distribuida uniformemente, y antes de que finalizase el tiempo de trabajo, se empleó un espátulín envuelto en papel mojado, de modo que la silicona no se adhiriese al papel, y se fueron dando ligeros toques sobre la silicona con el fin de aplacarla y conseguir la uniformidad deseada, eliminando las crestas que aparecen al aplicar esta segunda capa. De este modo la superficie quedó rugosa pero no especialmente irregular, con lo que posteriormente la carcasa de escayola y el molde de silicona tendrían el encaje adecuado.



Fig. 489 En la imagen la segunda capa de silicona ha sido aplacada en su totalidad. ©María Ávila Rodríguez.

Transcurrido de nuevo el tiempo de curado, la silicona se encontraba lista para ser manipulada y se había convertido en un material flexible. Se retiraron entonces la barrera de barro y las colas de milano, quedando únicamente la silicona que envolvía la pieza y la base de barro que configuraría el plano de junta para realizar la carcasa. Con una tijera se terminaron de perfilar las colas de milano en la silicona para que la escayola con la que se realizaría el contramolde las registrase correctamente.

La carcasa o contramolde fue preparada con escayola, puesto que debía sustentar y mantener la forma del molde flexible. Transcurrido el tiempo de fraguado, endureció y la carcasa fue repasada para darle uniformidad y que presentase una forma lo más plana posible. De este modo, al darle la vuelta para realizar la segunda parte del molde, la escayola sirve de base recta y estable.



Fig. 490 En la imagen de la izquierda las colas de milano y las barreras empezaban a ser retiradas. En la imagen del medio todas las barreras habían sido retiradas y las colas de milano de silicona habían sido recortadas. Por último, a la derecha puede verse la carcasa de escayola de la primera parte del molde. ©María Ávila Rodríguez.

Se dio entonces la vuelta al molde y se comenzó con la segunda parte del mismo. Antes de ello, se retiró el barro y la pieza fue limpiada, puesto que el barro la había manchado. Se repasaron también aquellas colas de milano de escayola que no habían quedado niveladas a la altura de las de silicona, empleando para ello rasquetas y espátulas.





Fig. 491 En la imagen superior puede verse el aspecto del molde al darle la vuelta para comenzar con la segunda parte del mismo. La antorcha podía verse, aunque aparecía oculta entre el barro. En la imagen central comenzaba a descubrirse parte de la misma, eliminando todo el barro que configuró el plano de junta y la base de la carcasa. Por último, en la imagen inferior todo el barro había sido eliminado y quedaba solo la pieza envuelta en la silicona y la carcasa de escayola. ©María Ávila Rodríguez.



Fig. 492 Primera parte del molde con la antorcha lista y limpia. ©María Ávila Rodríguez.

Para comenzar con la segunda parte del molde, era necesario crear un nuevo encofrado que cumpliese la función de “dique”. Antes de ello, se aplicó primero vaselina por toda la superficie del molde, ya que la silicona que se aplicaría después no podía entrar en contacto con esta primera o, de lo contrario, se adherirían entre sí las dos partes del molde.



Fig. 493 La secuencia de imágenes muestra cómo se aplicó la vaselina, seguida por la realización del nuevo encofrado y finalmente las colocación de las colas de milano con el barro. ©María Ávila Rodríguez.

El proceso de la silicona se repitió tal y como se realizó en la otra parte del molde: se aplicó una primera capa de registro, y posteriormente, transcurrido el tiempo de curado, se aplicó la segunda capa con el tixotrópico añadido a la mezcla para que aportase grosor. Una vez esta segunda capa de silicona hubo curado, se retiró todo el barro y se recortaron las colas de milano, para conseguir que las piezas tuviesen cortes limpios y sin las rebabas causadas por pequeñas filtraciones de la silicona.



Fig. 494 En la imagen superior aparece la primera capa de registro de la segunda parte del molde. En la inferior, se aprecia la segunda capa de silicona, esta vez aplicada con tixotrópico. ©María Ávila Rodríguez.

Antes de realizar el contramolde, se hicieron sobre la escayola de la primera parte del molde unas llaves semiesféricas, para que ambas carcasas encajaran entre sí de la manera más correcta posible. Con las llaves ya preparadas, se limpió bien el molde para eliminar todos los restos barro y escayola que hubiesen podido ensuciarlo y se aplicó vaselina nuevamente por toda la superficie para que las escayolas no quedasen adheridas. Con todo listo se realizó la nueva carcasa y, transcurrido el tiempo de fraguado, fue repasada para proporcionarle la misma uniformidad que a la primera parte del molde.

El molde finalizado fue abierto y se extrajo la pieza del interior del mismo. Era entonces el momento de realizar las pruebas previas al vaciado definitivo.

Se empleó la resina Epofex EX402 y su endurecedor E-430, con filtro UV para favorecer la estabilidad de la reproducción y evitar su amarilleamiento puesto que, al tratarse de un monumento situado al aire libre, la antorcha estaría sometida a la radiación solar y a la climatología. La resina fue utilizada con las proporciones indicadas por el fabricante: 100g de resina que se mezclaron con 30g de endurecedor.

Además, fueron seleccionados los pigmentos que serían necesarios para lograr la tonalidad de la pieza que iba a reproducirse. En este caso se emplearon polvo de aluminio, tierra sombra tostada y blanco de titanio.

Para la realización de las pruebas se empleó una pequeña cantidad de esta mezcla. Se comenzó, antes de aplicar la mezcla, añadiendo una pátina de pigmento sombra sobre una zona del molde de silicona. Después se aplicó una ligera capa de polvo de aluminio y por último se mezcló la resina con su endurecedor. A la mezcla der resina se le añadió bentonita, en concreto Bentone SD®, blanco de titanio y polvo de aluminio, hasta que se obtuvo el color de base idóneo para la pieza. Esta masa fue aplicada cuidadosamente, con espátula, sobre el pigmento depositado previamente en el molde. Transcurrido el tiempo de curado de esta resina, 72 horas, pudieron retirarse las pruebas realizadas y la resina había atrapado y aglutinado el pigmento.



Fig. 495 En la imagen superior aparecen dos pruebas aplicadas en el molde, que aparecen en la imagen inferior retiradas del molde. ©Sonia Santos Gómez.



Fig. 496 En la imagen superior, aparece el molde abierto y listo para realizar dos pruebas más. En el extremo inferior de la pieza, en la zona próxima al vástago, puede observarse que la pieza ya había sido manchada con los pigmentos para recibir la resina de nuevo. En la imagen inferior se había aplicado resina para realizar dos nuevas pruebas y a la derecha se aprecian las dos primeras pruebas realizadas anteriormente. De este modo, se pudieron comparar entre sí y en esta segunda fase de pruebas se aclararon los tonos con respecto a sus predecesoras, a fin de obtener diferentes posibilidades para poder escoger la que más se ajustara al original. ©Sonia Santos Gómez.

Una vez se dispuso de cuatro pruebas de color, estas se situaron en el monumento, con la intención de valorar cuáles eran las tonalidades más adecuadas y si era necesario repetir más pruebas.



Fig. 497 Pruebas de color comparadas con la escultura. ©Sonia Santos Gómez.

De este modo, gracias a las pruebas realizadas se pudo conocer la cantidad de espesante que necesitaba la resina, los pigmentos que debían emplearse y como debía pintarse la silicona por lo que, con los componentes y sus cantidades para la mezcla escogidos, se procedió a realizar el vaciado definitivo.

En primer lugar, se pintó de nuevo (esta vez por completo) el molde y, posteriormente, fue aplicada la resina con espátula en ambas partes del mismo.

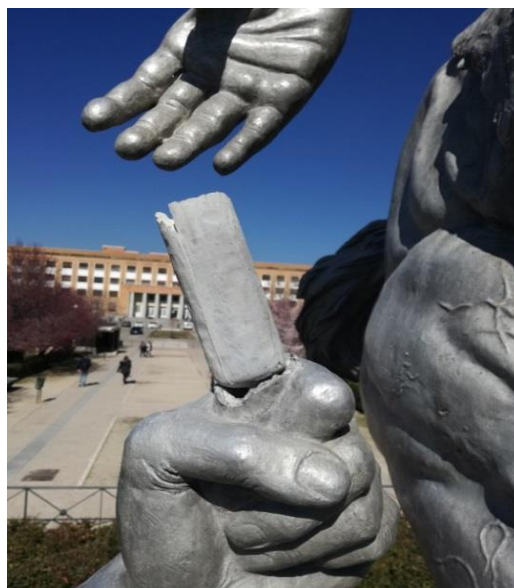


Fig. 498 Una de las pruebas situada directamente en el lugar y posición en que irá dispuesta. ©Lucio Zurdo.



Fig. 499 Arriba aplicando los pigmentos con pincel sobre el molde y abajo ambas caras de los moldes cubiertos totalmente por la resina. ©Sonia Santos Gómez.

Transcurridas 72 horas, tiempo de curado de la resina, fue aplicada una nueva capa con el color de base sobre la primera, pero esta vez con un refuerzo de fibra de vidrio (mat¹⁴¹), a fin de engrosar y reforzar la pared del vaciado.



Fig. 500 Aplicando la nueva capa de resina y el refuerzo de fibra de vidrio. ©Sonia Santos Gómez.

También se incluyó un vástago de fibra de vidrio epoxi que actuaría como estructura interna de la pieza. En los laterales de los límites de las piezas se aplicó más mezcla configurándose así un cordón de sellado que por supuesto debía ser del mismo todo que el color empleado para rellenar el molde. Este cordón de sellado se preparó con más cantidad de Bentone® para asegurar que la mezcla del interior no se escapase.



Fig. 501 Posicionando el vástago de fibra de vidrio epoxi que actuaría como estructura interna de la pieza. ©Sonia Santos Gómez.

¹⁴¹ La fibra de vidrio en forma de mat emulsión es también conocida con el nombre de manta y se trata de una serie de hilos de vidrio prensados mediante una emulsión soluble en resinas de poliéster o epoxi (Feroica, s.f.).



Fig. 502 Cordón de sellado aplicado en todos los márgenes de la pieza.
©Sonia Santos Gómez.

Se aplicó de nuevo vaselina en la zona de la escayola próxima a la resina, puesto que, si esta desbordaba, quedarían adheridas las dos partes del molde. Cuando el molde fue cerrado, se presionó con gomas a fin de que la junta del vaciado fuera lo menos visible posible.



Fig. 503 Molde cerrado con las gomas para realizar el vaciado definitivo. ©Lucio Zurdo.

Una vez transcurridas las 72 horas, tiempo de endurecimiento indicado por el fabricante, se abrió el molde, se extrajo la antorcha y se eliminaron con un bisturí las rebabas de resina.



Fig. 504 Una vez transcurridas 72 horas, el molde fue abierto y se extrajo la antorcha del mismo. ©Sonia Santos Gómez.

Finalmente, se realizó un bruñido de la pieza que proporcionó un brillo metálico a la misma más acusado. Este fue realzado, además, mediante una ligera capa de spray color cromado. Sin embargo, antes de colocar el modelo de escayola en la escultura, hubieron de eliminarse los restos de resina y parte del vástago que habían sido empleados en la anterior restauración, cuando la antorcha original robada apareció y esta pudo ser recolocada en su ubicación primigenia. Para eliminar esos restos hubo de ser empleado un taladro.



Fig. 505 Taladro eliminando los restos de resina de la mano. ©Guillermo Quirós Carretero.



Fig. 506 A la izquierda aparece el hueco donde la antorcha debía ser situada, antes de su limpieza, mientras que a la derecha el hueco había quedado limpio y libre para colocar la nueva antorcha. ©Lucio Zurdo.

Con el hueco limpio, se midió previamente con ayuda de una broca el recorrido que podría ocupar el vástago, para obtener así sus medidas. Para ello se situó la broca en el hueco y se midió la distancia que esta recorría. Se obtuvo así la medida y el vástago pudo ser cortado con la medida idónea. Una vez se comprobó que la nueva pieza y el vástago encajaban perfectamente en el hueco, pudo procederse a su unión definitiva mediante el empleo de resinas.



Fig. 507 La broca empleada sirvió para obtener las medidas que el vástago debía tener. ©Sonia Santos Gómez.



Fig. 508 Prueba de inserción de la antorcha en el lugar que ocuparía. ©Sonia Santos Gómez.

Para fijar la antorcha al conjunto escultórico, se emplearon diversas resinas, cada una de ella con distintos fines: una resina epoxi de curado rápido durante el proceso de su colocación y unión, otra con un curado de 24h para el relleno interno, aplicada con espátulín y jeringuilla para fijar la antorcha más sólidamente y como relleno y, por último, en la zona más visible de la unión, se empleó la misma epoxi empleada en el vaciado, con filtro ultravioleta puesto que se encontraría expuesta a la luz del día. Este detalle era fundamental para que toda la resina epoxi visible empleada en la realización de la antorcha estuviese constituida por el mismo material y envejeciese de manera uniforme (Santos et al., 2018, p.71).

El conjunto fue sustentado durante el tiempo de curado en la posición correcta con el fin de conseguir que las 24 horas necesarias para el endurecimiento de la resina, la antorcha no se moviese de su posición. Para ello, se empleó poliestireno extruido, que ejerció como relleno intermedio entre la mano derecha del jinete y la antorcha, además de cinta adhesiva para sujetar el conjunto. Esta actuación fue indudablemente imprescindible puesto que, durante las 24 horas necesarias para el endurecimiento total de la resina, el peso del modelo junto con la posición inclinada en que debía situarse, hubiesen desencadenado un cambio seguro de la posición necesaria, perpendicular desde todos los ángulos al suelo.



Fig. 509 Preparando la mezcla de resina *in situ* antes de ser aplicada con la jeringuilla. ©Sonia Santos Gómez.

En el momento en que la pieza se encontraba correctamente situada y sostenida por los bloques de poliestireno, pudo rellenarse el hueco a través de un orificio por el que cual se aplicó la mezcla de resina. Con esta aplicación la antorcha quedaba finalmente instalada y la integridad física de la obra, en la cual la antorcha constituye un elemento clave, había sido finalmente restituida.



Fig. 510 Zona de inserción de la antorcha limpia tras el empleo del taladro. ©Sonia Santos Gómez.



Fig. 511 En la primera imagen aparecen ambas manos protegidas para que durante la intervención no sufriesen daño alguno; en la imagen central la antorcha había sido preparada y envuelta con poliestireno para conseguir que, tal y como se aprecia en la última imagen, se mantuviese fija en su posición exacta mientras la resina endurecía por completo. ©Sonia Santos Gómez.

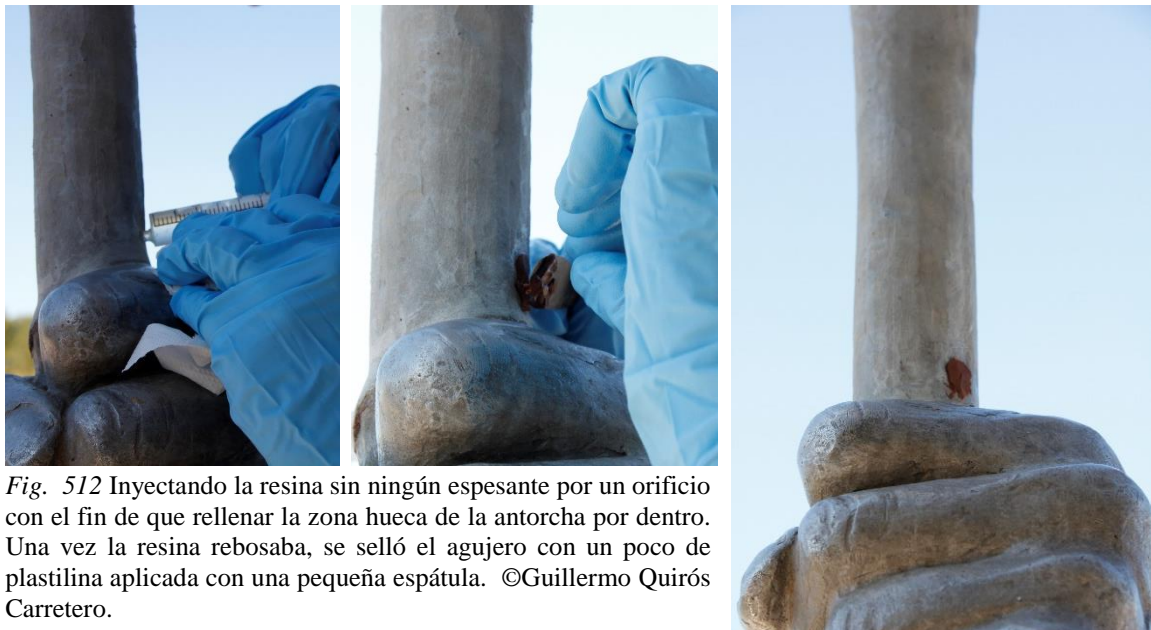


Fig. 512 Inyectando la resina sin ningún espesante por un orificio con el fin de que rellenar la zona hueca de la antorcha por dentro. Una vez la resina rebosaba, se selló el agujero con un poco de plastilina aplicada con una pequeña espátula. ©Guillermo Quirós Carretero.



Fig. 513 Aplicación de la última resina, con filtro UV, para unir la antorcha con la escultura. Tras la colocación de la antorcha, esta se selló con plastilina con el fin de poder trabajar mientras la resina aún no había endurecido. Una vez esta ha endurecido, pasadas 72 horas, se limó su exceso con una lima de hierro. ©Sonia Santos Gómez.



Fig. 514 Objeto de estudio ampliado. ©Sonia Santos Gómez.

Además de la colocación de la antorcha, se realizaron trabajos de limpieza del entorno, eliminación de grafitis, adecuación de jardines, y trabajos sobre el pedestal de piedra con la colaboración de Obras, Jardines y Mantenimiento (Quirós, G., comunicación personal vía e-mail, 7 de marzo de 2018).



Fig. 515 Trabajadores limpiando los grafitis de las esculturas. ©Guillermo Quirós Carretero.

De este modo, el 29 de marzo de 2017 la escultura volvía a estar completa y un día después, el 30 de marzo, se llevó a cabo un acto inaugural de las actividades conmemorativas por la creación en 1927 de la Junta Constructora de la Ciudad Universitaria. Intervinieron en él la presidenta de la Comunidad de Madrid, Cristina Cifuentes; la alcaldesa de Madrid, Manuela Carmena, y los rectores de las otras dos universidades que comparten con la UCM el uso del campus, Alejandro Tiana, de la UNED, y Guillermo Cisneros, de la Politécnica (Martín, 2017b). Entre otras actividades, estuvo programada la visita a la escultura, así como la toma de las fotografías correspondientes.



Fig. 516 Imagen de la estatua el miércoles 29 de marzo. ©Jesús de Miguel.

Tal y como indicó Andradás, rector de la UCM, es labor de todos “conservar este enclave tan privilegiado en el que convive el conocimiento, la investigación, la cultura, la arquitectura, la historia o la biodiversidad” (Martín, 2017b).



Fig. 517 Manuela Carmena tuvo que irse a otro acto antes de visitar la escultura *Los portadores de la Antorcha* y en su lugar posó un representante del Ayuntamiento junto a los rectores y la presidenta. ©Jesús de Miguel.

Tras su inauguración, la coordinadora del proyecto, Sonia Santos explicaba que esta antorcha no era la que definitivamente quedaría instalada en la escultura puesto que "Esta es una réplica en resina muy aproximada de la original, pero la intención es realizar una totalmente exacta en aluminio, material con el que está hecho el resto del conjunto" (Martín, 2017a).

Desgraciadamente, solo una semana después, la mañana del lunes 3 de abril, la escultura amaneció sin antorcha. La noche del viernes anterior se habían celebrado en las inmediaciones del monumento fiestas propias de los últimos de días de clase, puesto que ese viernes daban comienzo las vacaciones escolares de Semana Santa. En las inmediaciones del metro de Ciudad Universitaria apareció la antorcha completamente destrozada.

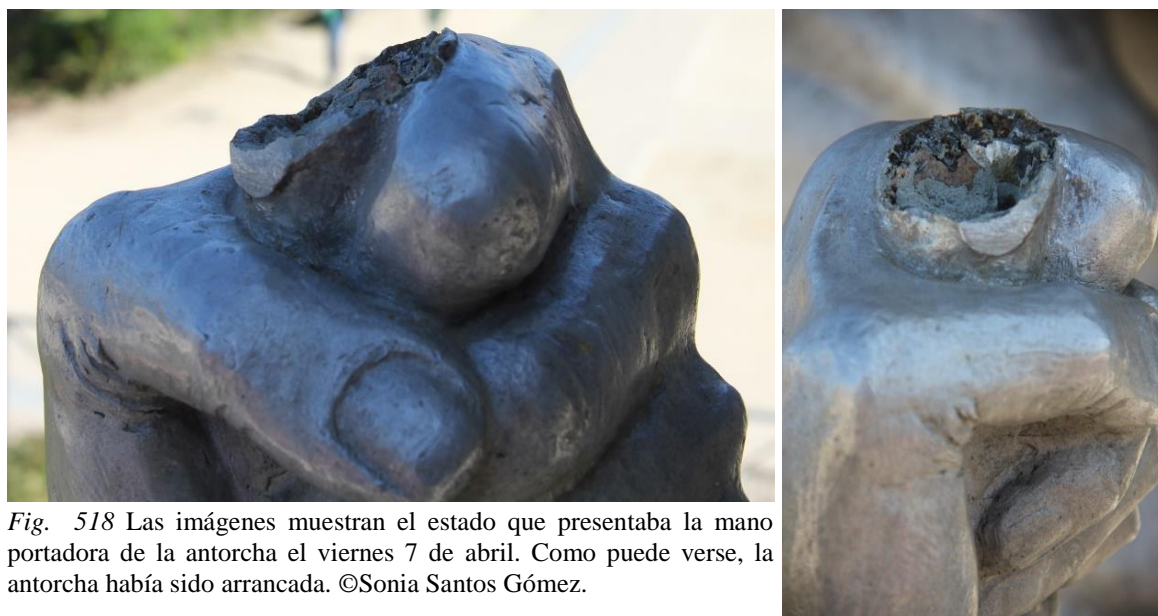


Fig. 518 Las imágenes muestran el estado que presentaba la mano portadora de la antorcha el viernes 7 de abril. Como puede verse, la antorcha había sido arrancada. ©Sonia Santos Gómez.



Fig. 519 En las imágenes aparece la antorcha rota en numerosos fragmentos. Esta fue encontrada en las inmediaciones del metro de Ciudad Universitaria y se recogieron todos los fragmentos.
©Sonia Santos Gómez.

Tras el suceso, Guillermo Quirós Carretero, de la Unidad de Gestión del Patrimonio Histórico de la UCM, tomó la decisión de llevarse el modelo torneado para preparar de nuevo otra antorcha, en este caso en aluminio. La pieza fue llevada a una fundición donde se preparó un molde que podría usarse tanto para preparar la pieza en aluminio como para positivarla en resina.

Mientras se decidía cual era la mejor opción, se celebraba el 11 de septiembre de 2017 en la Ciudad Universitaria la jornada *Archer M. Huntington y la Ciudad Universitaria*, organizada por la Universidad Complutense de Madrid en colaboración con la Hispanic Society. El acto conmemoraba el 90 Aniversario de la Ciudad Universitaria, que versó sobre el mecenazgo y su importancia en la acometida de las obras de los proyectos del Campus hace 90 años.

El rector de la Universidad Complutense inauguró la jornada académica y John O'Neill, jefe del departamento de Manuscritos y Libros Raros de la *Hispanic Society Museum & Library*, pronunció la conferencia inaugural. Previamente, a las 9:30 h, se realizaría una sesión fotográfica ante el grupo escultórico (Ucm, 2017b) por lo que la antorcha debía estar instalada. El día anterior a la jornada se instaló una nueva pieza de resina epoxídica maciza, armada con un vástago de acero inoxidable liso y realizada por la empresa Arte 6, fundición especializada. La pieza fue ensamblada en la escultura con resina epoxídica.

Desafortunadamente, el 26 de septiembre, coincidiendo de nuevo con otra festividad de estudiantes, la antorcha se intentó arrancar una vez más. A pesar de que en esta ocasión el ensamblaje resistió, la réplica sufrió daños significativos en la parte inferior del vástago y el perno de acero quedó doblado por efecto de la palanca ejercida sobre la antorcha.



Fig. 520 Antorcha de resina maciza instalada de nuevo.
©Guillermo Quirós Carretero.

El martes 3 de octubre se volvió a encontrar que la antorcha ha sufrido vandalismo y en otro intento de arrancar la antorcha de la mano del portador, se había doblado el perno de acero en un ángulo más acusado, quedando vencida casi en posición horizontal. Gestión del Patrimonio Histórico de la UCM se encargó de desmontarla el 6 de octubre y se procedió a consultar diferentes opciones (Quirós, G., comunicación personal vía e-mail, 7 de marzo de 2018).

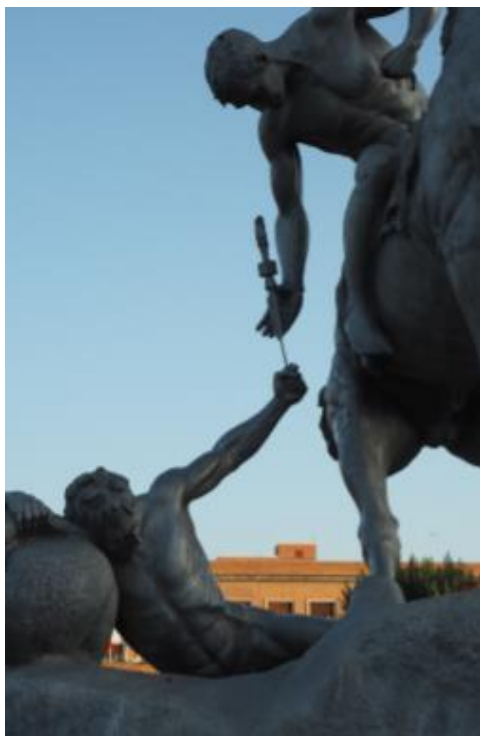


Fig. 521 A la izquierda la antorcha el 26 de septiembre: la parte del cuerpo presentaba graves daños y en la parte baja solo el vástago había resistido. A la derecha la antorcha el 3 de octubre, cuando ya había sido forzada y se había conseguido torcerla. ©Guillermo Quirós Carretero.

Por un lado, Patrimonio Histórico de la UCM, en su propuesta para la intervención sobre la escultura, barajó diferentes opciones puesto que contaba con una réplica en aluminio que fue encargada a la fundición Arte 6 cuando (en previsión de instalarla como definitiva cuando se diera el caso) se encargó la réplica en resina. De este modo, la UCM junto con los técnicos de Arte 6 plantearon las siguientes posibilidades (Quirós, G., comunicación personal vía e-mail, 7 de marzo de 2018).

- Instalación de la copia de aluminio mediante soldadura del vástago a la estructura de la escultura o por unión química mediante un consolidante termoestable.
- Instalación de otra réplica en resina del mismo modo que se instaló la anterior.

- Instalación de una réplica en resina o en aluminio con sistema de ensamblado no permanente. Con esta opción se planteaba la instalación de un sistema que permitiese montar y desmontar la réplica en resina o en aluminio.

Muy recientemente se ha tenido noticia de que las autoridades cubanas podrían dar la autorización para realizar las fotografías de su antorcha y, por tanto, podría realizarse la fotogrametría de la pieza. Se plantearía entonces ejecutar un modelo aún más exacto que el realizado, aunque sigue pendiente el tema de la supervivencia del nuevo vaciado colocado en la escultura, esta pieza podría ser vaciada en aluminio y montarse únicamente cuanto algún acontecimiento de relieve lo exigiera (Santos et al., 2018, p.73).

La decisión tomada en la actualidad ha sido no instalar la antorcha hasta que puedan implantarse mayores medidas de seguridad que garanticen que la obra no va a ser de nuevo dañada. La titularidad del modelo fresado pertenece a la Complutense y este es conservado cuidadosamente en Patrimonio como fundamental medida de conservación preventiva.

9. 2. 2. 3 Resultado del proyecto

La primera parte del proyecto (Ucm, 2015) concluyó con uno de los principales objetivos generales alcanzado, ya que se desarrolló y planteó una metodología de trabajo que constituye en sí un planteamiento de conservación preventiva para esculturas expuestas al aire libre y que presentan partes susceptibles de robo.

Además, se logró conocer y documentar las diversas versiones que existen del conjunto escultórico *Los Portadores de la Antorcha* en todo el mundo: España (en Madrid y Valencia), Estados Unidos (4) y Cuba (1), de modo que se llegaron a identificar aquellos que presentan antorchas iguales a la desaparecida de Ciudad Universitaria de Madrid.

El equipo investigador comprobó *in situ* que la antorcha de la versión de Valencia es diferente a la de Ciudad Universitaria de Madrid, quizás porque también fue robada y la nueva antorcha que hoy puede verse fue realizada por una fundición de manera aproximada sobre lo que se recordaba de la original.

Se documentó fotográficamente la antorcha de la versión de Valencia, por si no fuera posible realizar la modelización 3D de la de Madrid en base al empleo de las escasas fotografías existentes de la misma o por si no se pudiera realizar fotogrametría de una antorcha igual de otro país.

Por otro lado, fue modelada en 3D la antorcha de Ciudad Universitaria a partir de las seis fotografías existentes de la antorcha desaparecida. La obtención de estos datos, así como su salvaguarda, es de gran importancia y fundamental para la realización futura, si se deseara, de nuevas réplicas de la antorcha, tanto en resina como en aluminio.

Por su parte, en la segunda parte del proyecto (Ucm, 2017a) se consiguió materializar el modelo 3D mediante la utilización de fresadora 3D, torno y microtorno. Se empleó como material a desbastar Necuron®. También la obtención de este modelo es fundamental ya que, a partir de él, podrán realizarse, siempre que se desee, moldes y positivos, en resina o aluminio.

De este modelo materializado se realizó el molde y el vaciado, que configuró la elaboración de la réplica de la antorcha en resina. La reproducción presentaba su coloración definitiva y con un aspecto perfectamente integrado con el resto de la escultura.

Se colocó, por tanto, y unió la antorcha a la escultura.

Por último, el proyecto ha servido para dar a conocer al alumnado estas metodologías de trabajo de cara a que se familiaricen con las técnicas avanzadas de diseño, digitalización y restauración de bienes culturales, a fin de facilitar su futura inserción en el mercado laboral.

Esta transmisión del conocimiento se materializa gracias también a la realización del vídeo donde se explica la metodología del proyecto desarrollada.



Fig. 522 Video Realización reproducción los Portadores de la antorcha en Youtube. ©Sonia Santos Gómez.

9. 2. 3 Intervención en la Facultad de Farmacia

La Universidad Complutense cuenta con un importante patrimonio histórico y cultural recogido en diferentes museos de carácter histórico, artístico, científico o técnico. Las colecciones han sido reunidas a partir de la labor docente e investigadora desarrollada en múltiples centros de la Complutense a lo largo de su historia y se consideran bienes muebles integrantes del Patrimonio Histórico de la UCM, por lo que disfrutan del régimen de protección otorgado por el Reglamento de Museos UCM (Ucm, s.f. b).

Uno de estos Museos Complutenses se encuentra en la Facultad de Farmacia. Así, el Museo de la Farmacia Hispana (Ucm, s.f. a) constituye una de las más completas colecciones de objetos relacionados con la práctica docente de la propia Facultad, la actividad farmacéutica y el medicamento.

Entre sus fondos, destacan las colecciones de recipientes cerámicos, morteros y cajas de madera policromada, en su día material de trabajo utilizado en la elaboración, conservación y dispensación de medicamentos.

El Museo se organiza en cinco boticas históricas, que han sido rescatadas y reubicadas en el interior; y tres instalaciones museográficas que recrean un laboratorio alquimista, una botica Hispano-árabe y la botica del Hospital de San Juan de las Afueras de Toledo.

Este Museo comienza a gestarse en los primeros años del s. XX por iniciativa de Rafael Folch Andreu, catedrático de Historia de la Farmacia en 1915 y coleccionista, que convirtió su afición en legado histórico. Su colección, ubicada inicialmente en la madrileña calle de la Farmacia, en el edificio de la antigua Facultad, fue acrecentándose mediante la compra de piezas con cargo a los excedentes que, para prácticas, recibía la cátedra por parte de la Universidad. La construcción de la actual Ciudad Universitaria hizo posible el proyecto de creación del Museo de Historia de la Farmacia para el que se concedieron unas estancias, ampliadas años más tarde, que son las que actualmente ocupa. En 1944, cuando se produce el traslado al nuevo emplazamiento, Folch ya había conseguido ampliar su colección notablemente y en 1951, con la edad de jubilación ya alcanzada, el museo se inauguró. Su hijo, Guillermo Folch Jou, encargado de cátedra, se ocupó entonces de la

dirección del Museo, ampliando las colecciones con piezas de su colección particular y con el mecenazgo de la propia Universidad, hasta su fallecimiento en 1985.

La dirección del Museo fue asumida entonces, y así continúa actualmente, por el catedrático de Historia de la Farmacia Francisco Javier Puerto Sarmiento. Bajo su dirección y con el apoyo del profesor Benito del Castillo, Decano de la Facultad de Farmacia durante un largo periodo de tiempo, las colecciones han seguido incrementándose.

De las farmacias antiguas expuestas en el Museo, la Hispano-árabe es objeto de investigación de la presente tesis, estableciéndose la restauración de sus yaserías como estudio de caso.

Dicha farmacia constituye una reproducción de una farmacia toledana del s. XIV y fue realizada en los años cincuenta del s. XX para ser exhibida en el Tercer Congreso de Sanitarios Españoles. Es un fiel reflejo de éste tipo de establecimientos, pequeños comercios abiertos al zoco en los que se trabajaba a la vista del público, puesto que está inspirada en miniaturas y grabados de la época.

Como puede observarse en las imágenes, los muros de la farmacia Hispano-árabe se encuentran, algo muy común en arte islámico, decorados con motivos geométricos constituidos por estrellas de lacería. El grupo de estrellas presenta dos tamaños claramente diferenciables.



Fig. 523 Imágenes de la Farmacia Hispano-árabe.
©María Ávila Rodríguez.

De este modo la Farmacia Hispano-árabe fue escogida como estudio de caso para su restauración empleando la tecnología 3D. Se ha tratado así de solventar el problema de la existencia de faltas geométricas en los elementos decorativos de las yeserías.

Para el caso que se mostrará a continuación, fueron escogidas tres estrellas; en concreto, las que presentaban pérdidas de mayor tamaño. Sin embargo, también existe una gran cantidad de estrellas que cuentan con pequeñas perdidas en los extremos de sus puntas.

El estado de conservación del conjunto de estrellas era, en general, deficiente, puesto que las estrellas se separaban del muro y rompían con facilidad. Sería recomendable, por tanto, la realización de un tratamiento de consolidación en todas las estrellas con el fin de reforzar su adhesión al muro puesto que el adhesivo que se empleó, bien ha perdido su capacidad adhesiva, bien no fue aplicado correctamente. Además, existían estrellas anteriormente restauradas, puesto que a simple vista podían observarse fragmentos adheridos e incluso reintegraciones cromáticas poco ajustadas. De este modo, todo apuntaba a que el problema de la consolidación afectaba a las piezas desde hacía tiempo. Aunque para esta tesis, de acuerdo al objetivo de la misma, se ha puesto en práctica únicamente el planteamiento de restauración que contempla la reintegración volumétrica de la obra, quedan pendientes otro tipo de intervenciones destinadas a consolidar algunas piezas y a mejorar su adhesión.

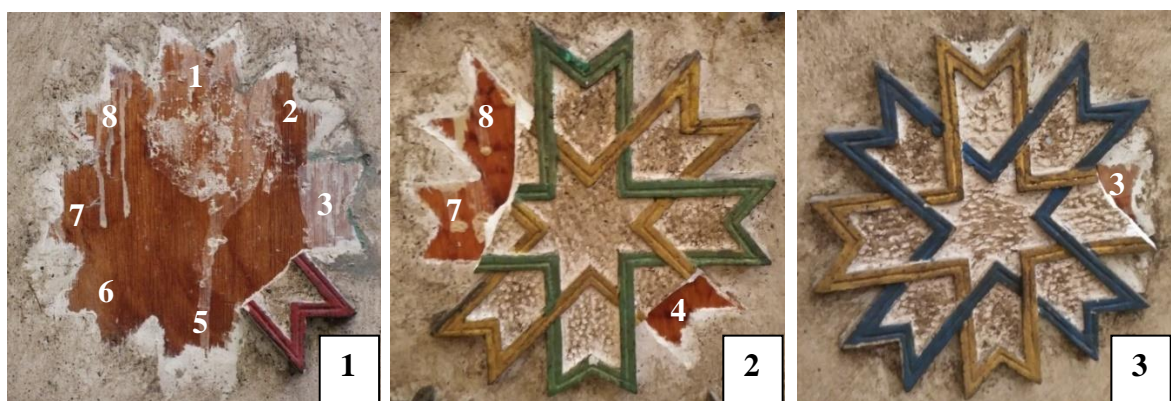


Fig. 524 Las imágenes muestras las 3 estrellas que presentaban daños más significativos. Cada una de ellas consta de 8 puntas, las cuales fueron numeradas para facilitar el estudio. La estrella nº1 había perdido toda su forma salvo su punta nº4, siendo la que peor estado de conservación presentaba. Le sigue la nº2, que había perdido sus puntas 4, 7 y 8; por último, la nº 3, que presentaba una pérdida más moderada en su punta 3. ©María Ávila Rodríguez.

En este estudio y, como se ha comentado, únicamente fueron intervenidas las 3 estrellas (ver fig. 524) que presentaban mayores faltas, aunque para realizar la reconstrucción volumétrica del resto de estrellas que aún no habían sido restauradas, podría aplicarse en ellas la metodología aplicada que será descrita a continuación. Igualmente, la metodología de trabajo podría ser empleada en obras de características similares.



Fig. 525 En la imagen aparecen localizadas las 3 estrellas. ©María Ávila Rodríguez.

Cuando fueron localizadas todas las estrellas dañadas, se procedió a realizar una prueba con la que se comprobaría si era posible restaurarlas empleando para ello el modelo 3D de una estrella que no presentase ningún daño. Se escogió, por tanto, una estrella que presentaba un buen estado de conservación y se le realizaron 68 fotografías, con el fin de emplearlas en el software Agisoft Photoscan y comprobar si el modelo que se obtenía presentaba las cualidades necesarias para que fuese empleado en la restauración de las 3 estrellas.



Fig. 526 Ejemplos de estrellas que presentan pérdidas en las puntas. ©María Ávila Rodríguez.

Se cargaron entonces las 68 fotos en el programa y antes de proceder al alineamiento de las fotos, se seleccionó con la opción de lazo, en cada una de ellas, la zona que interesaba. De este modo, el software sólo trabajaría con la información referente a la estrella objeto de estudio, descartándose el resto de la imagen. Esto conllevaría una considerable reducción del tiempo de trabajo y el peso del archivo que se obtuviese.



Fig. 527 Estrella escogida para realizar la prueba.
©María Ávila Rodríguez.

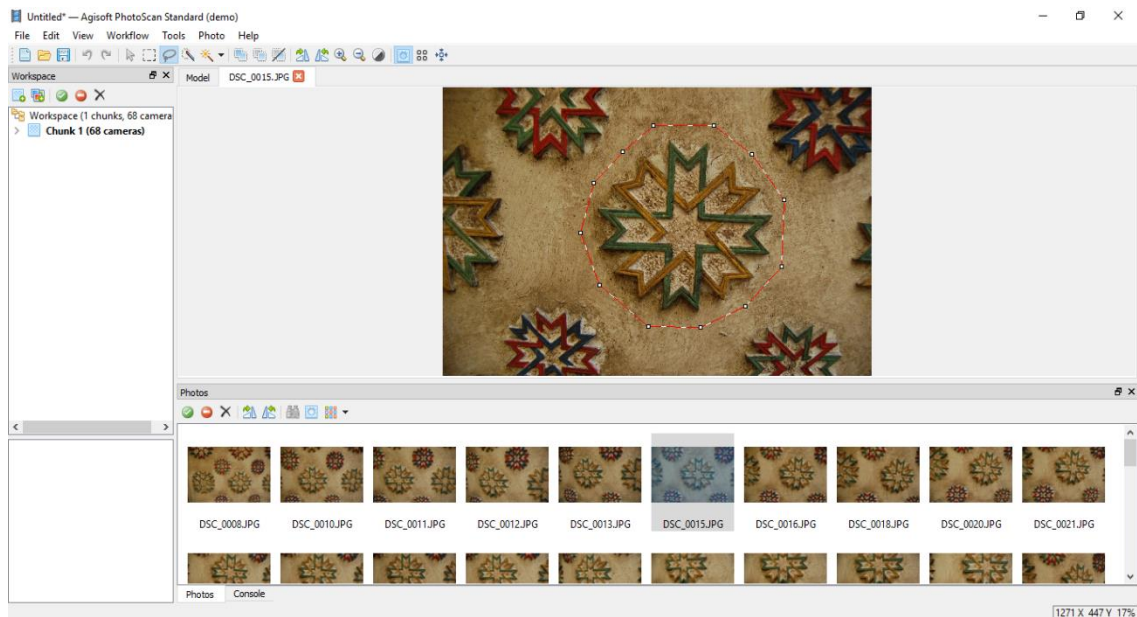


Fig. 528 En la imagen (superior) puede verse la captura de pantalla donde sale la fotografía que estaba siendo manipulada con el fin de seleccionar únicamente la estrella. Tras la selección quedaba marcada la zona que iba a ser empleada para la creación del modelo 3D (imagen inferior). ©María Ávila Rodríguez.



Con la estrella seleccionada en todas las fotos, se procedió al alineamiento de las mismas, obteniéndose así, la nube de puntos que formaría el modelo 3D.

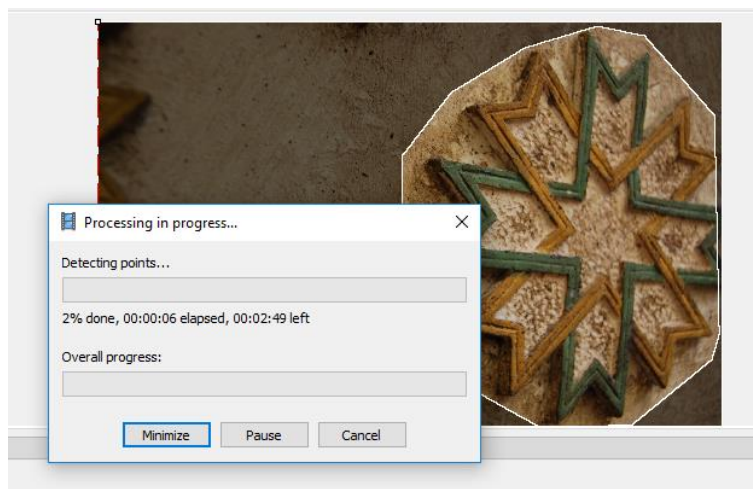


Fig. 529 Captura de pantalla que muestra el momento en que el software estaba detectando los puntos de unión entre las diferentes fotografías. ©María Ávila Rodríguez.

Una vez todos los puntos habían sido encontrados, el modelo comenzaba a definirse y tras obtener la nube de puntos densa, se pidió al software la consolidación de la malla seguido del modelo texturizado.

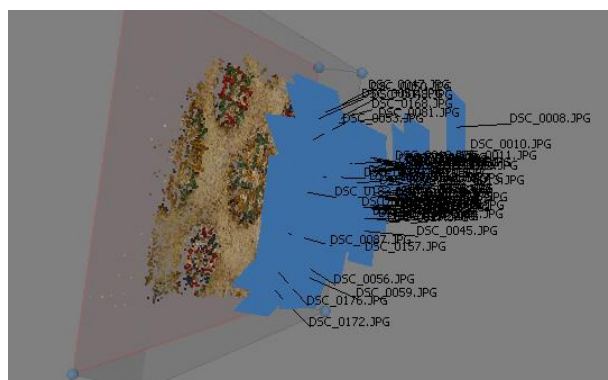


Fig. 530 El modelo comenzaba a definirse. En azul aparecen activadas las cámaras, es decir, la localización de cada una de las fotografías que se tomaron. ©María Ávila Rodríguez.

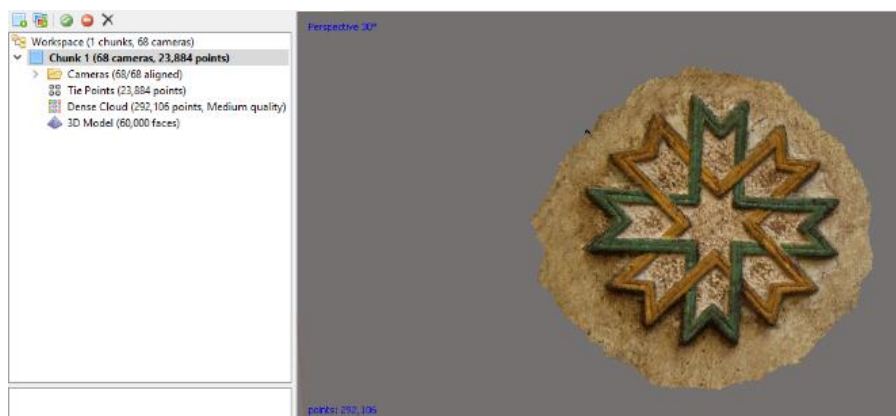


Fig. 531 Modelo 3D final obtenido. A la izquierda puede verse la información referente a las cámaras alineadas, el número de puntos y las caras del modelo. ©María Ávila Rodríguez.

El modelo texturizado presentaba un aspecto, al menos a simple vista, muy fiel a la realidad. Sin embargo, la estrella no había sido digitalizada con el fin de observarla desde el ordenador, si no que como ya ha sido mencionado, debía ser empleada en la restauración del resto de estrellas dañadas. Por ello, debería ser impresa en 3D y contar con el suficiente detalle, es decir, la superficie debía ser lo más cercana a la realidad posible. Para comprobarlo se seleccionó el modo wireframe¹⁴² del software, y pudo valorarse que realmente la prueba se había realizado con éxito.

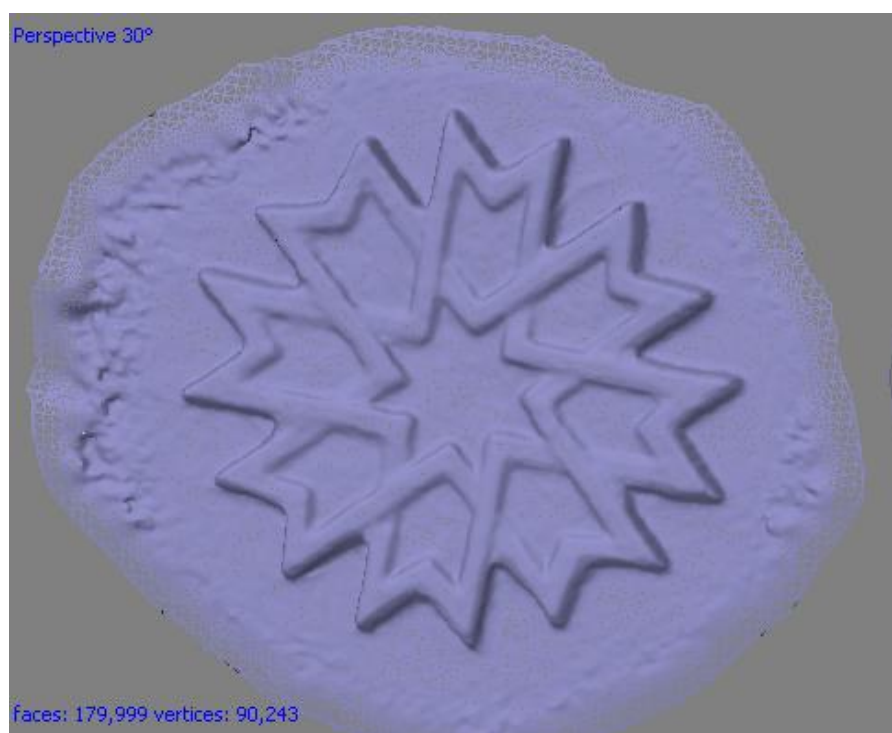


Fig. 532 Visualización del modelo en el modo wireframe. ©María Ávila Rodríguez.

Después de esta primera prueba, en la que pudieron apreciarse las necesidades de digitalización de la pieza, se realizaron las digitalizaciones definitivas: de las 3 estrellas deterioradas, de otra estrella grande, en buen estado y de otra de pequeño tamaño, para documentarla y tener preparado el archivo 3D en caso de necesitarse en un futuro dicha información para reintegrar posibles pérdidas que puedan producirse en las mismas.

¹⁴² El *wireframe* es una opción que suele aparecer en los programas de modelado 3D gracias a la cual el modelo aparece como una representación más simplificada en la que el objeto queda definido por sus ejes y/o bordes. Estas representaciones constan de puntos, líneas, arcos, círculos y otras curvas que definen los bordes o las líneas centrales de los objetos. Son muy útiles a la hora de generar diseños 3D básicos para evaluarlos, analizar las relaciones espaciales, incluidas las distancias entre las esquinas y los bordes y verificar visualmente con mayor facilidad los posibles errores (Autodesk, 2015), puesto que estos en ocasiones pasan desapercibidos en la malla y en las impresiones surgen numerosos problemas y fallos.

9. 2. 3. 1 Creación y edición de los modelos 3D

Para la toma de fotografías se pidió la colaboración de Mireya Arenas Patiño, compañera de carrera y de máster de la doctoranda, que se encontraba realizando también su tesis doctoral, en la que trata la conservación de nuevos soportes y montajes fotográficos contemporáneos.

Arenas Patiño posee una amplia formación en el campo de la fotografía y por ello, resultó muy útil su colaboración. Además, recientemente había adquirido una lente para realizar fotografías macro sin necesidad adquirir objetivos realmente caros. Se trata del “3 in 1 smartphone linse mit led leuchte. Model NY-J01”. La lente es un ojo de pez profesional y ajustable que funciona con teléfonos móviles de última generación. Esta se puede adaptar a iPhone, Samsung Galaxy, Sony, HTC, Huawei, etc y es una lente gran angular, macro 0.65X + 10X que cuenta con 3 niveles de iluminación LED.



Fig. 533 Arenas Patiño realizando fotografías a la estrella n°1. ©María Ávila Rodríguez.



Fig. 534 “3 in 1 smartphone linse mit led leuchte”. ©Amazon.

La lente fue muy útil a la hora de tomar fotografías de las zonas de rotura. Para realizar estas fotografías, la lente fue instalada en un teléfono móvil de última generación de la marca Huawei. Para la obtención de imágenes con gran detalle y muy ampliadas solo era preciso instalar la lente en el dispositivo móvil y acercarse todo lo posible a la zona que se quería fotografiar, hasta que la pantalla mostrase la zona de interés bien enfocada.

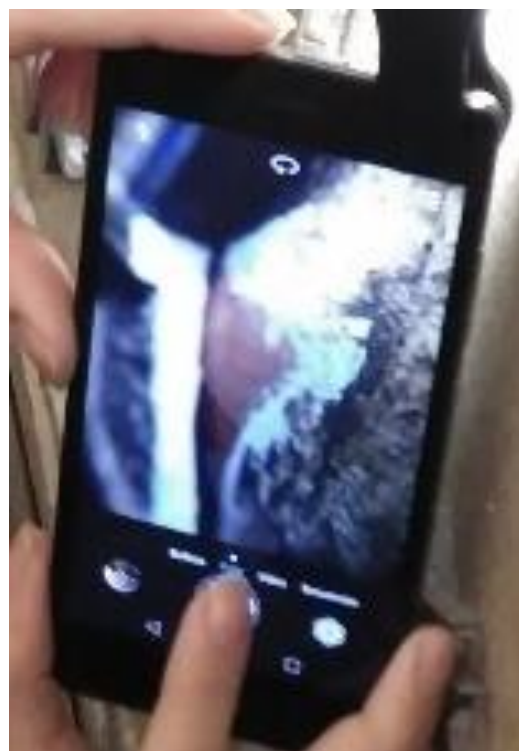
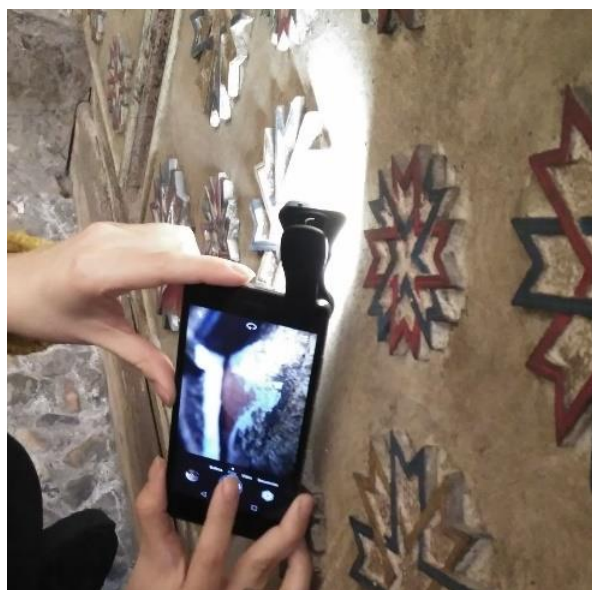


Fig. 535 Mireya Arenas Patiño realizando la toma de fotografías con la lente instalada en el dispositivo móvil. A la derecha, en el detalle de la imagen anterior, puede verse la pantalla del móvil donde se apreciaba la zona que se estaba documentando. ©María Ávila Rodríguez.



Fig. 536 Las imágenes muestran 3 ejemplos de los resultados obtenidos con utilización de la lente y el teléfono móvil. ©Mireya Arenas Patiño.

De este modo se obtuvieron los siguientes modelos 3D:

- Modelo estrella grande completa.
- Modelo estrella pequeña completa.
- Modelo estrella nº1.
- Modelo estrella nº2.
- Modelo estrella nº3.

A continuación, de muestra en detalle con imágenes el proceso de creación de cada uno de los modelos. En general, puede decirse que en todos se empleó la misma metodología:

- 1º Selección de imágenes en Photoscan.
- 2º Alineación de las imágenes para la obtención de la nube de puntos del modelo.
- 3º Generación de la nube de puntos densa.
- 4º Generación de la malla del modelo.
- 5º Generación de la textura del modelo.

Cuando los modelos se encontraban listos, se exportaron con la extensión .obj con el fin importarlos desde Blender, donde se editarían para trabajar con ellos más tarde en su restauración virtual. Los modelos fueron generados con las fotografías tomadas de las estrellas, que constituyen relieves escultóricos, por lo que en las fotografías empleadas para las creaciones de los modelos 3D también aparecía la pared donde están fijadas las estrellas. Por ello esta edición era fundamental a la hora de eliminar los polígonos que configuraban la geometría de la pared donde se sustentaban las estrellas puesto que en este caso solo debía trabajarse con las misas. De este modo, el fondo, la pared, fue eliminado de los modelos 3D desde Blender.

9. 2. 3. 1. 1 Creación y edición del modelo de la estrella grande completa

Para la creación del modelo completo de la estrella grande se siguieron los mismos pasos que los citados anteriormente.

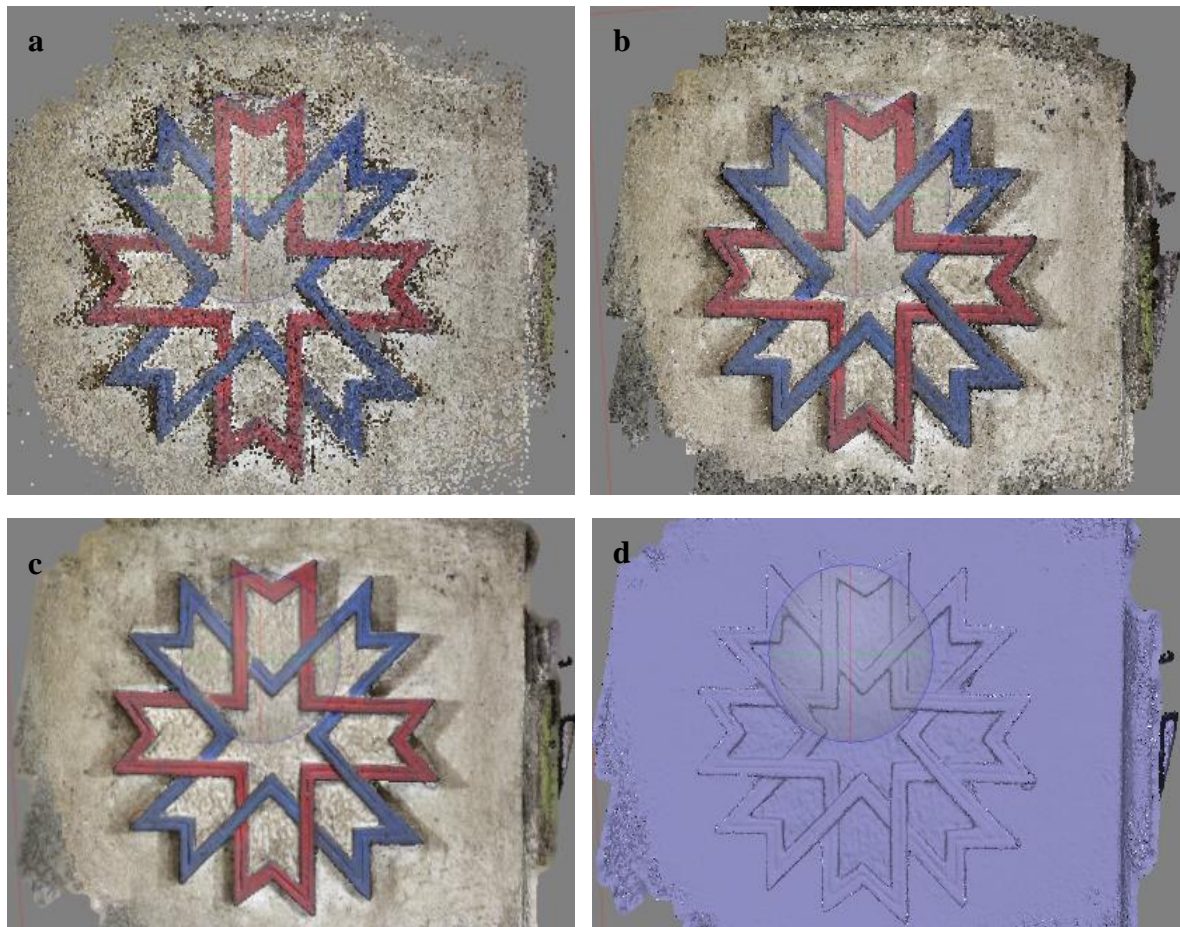


Fig. 537 Creación del modelo de la estrella grande completa: a) nube de puntos; b) malla; c) modelo con textura y d) visualización del modelo en el modo wireframe. ©María Ávila Rodríguez.

Una vez obtenido el modelo, este se exportó como .obj para abrirlo con Blender y poder así editarlo. Se eliminó toda la geometría que no era relevante para el proyecto, el fondo, seleccionando las zonas y eliminándolas en el modo edición del programa.

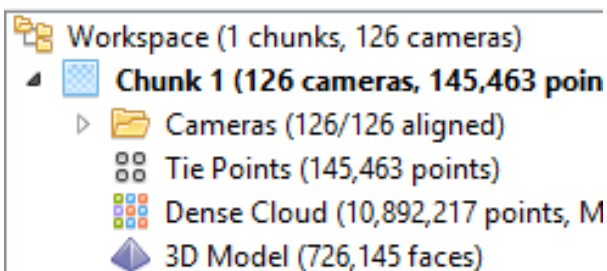


Fig. 538 Información referente al modelo. ©María Ávila Rodríguez.

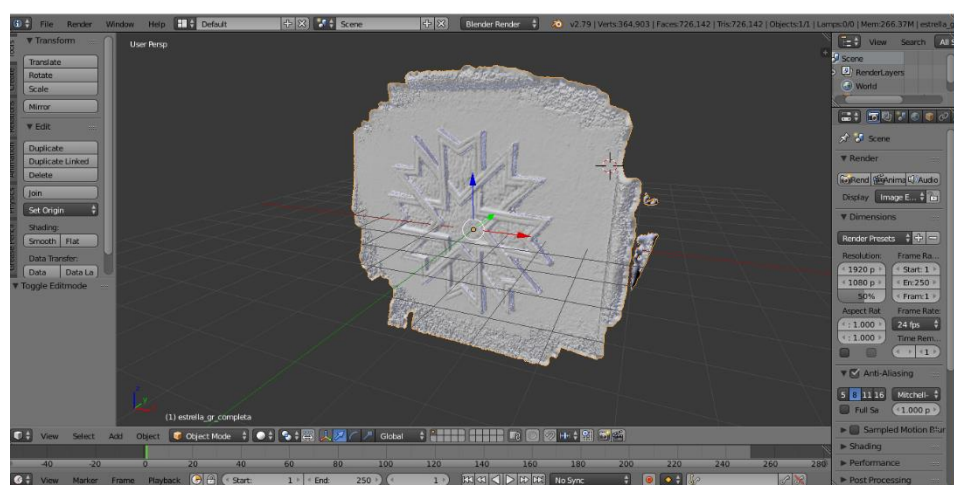


Fig. 539 Modelo abierto en Blender listo para comenzar su edición. ©María Ávila

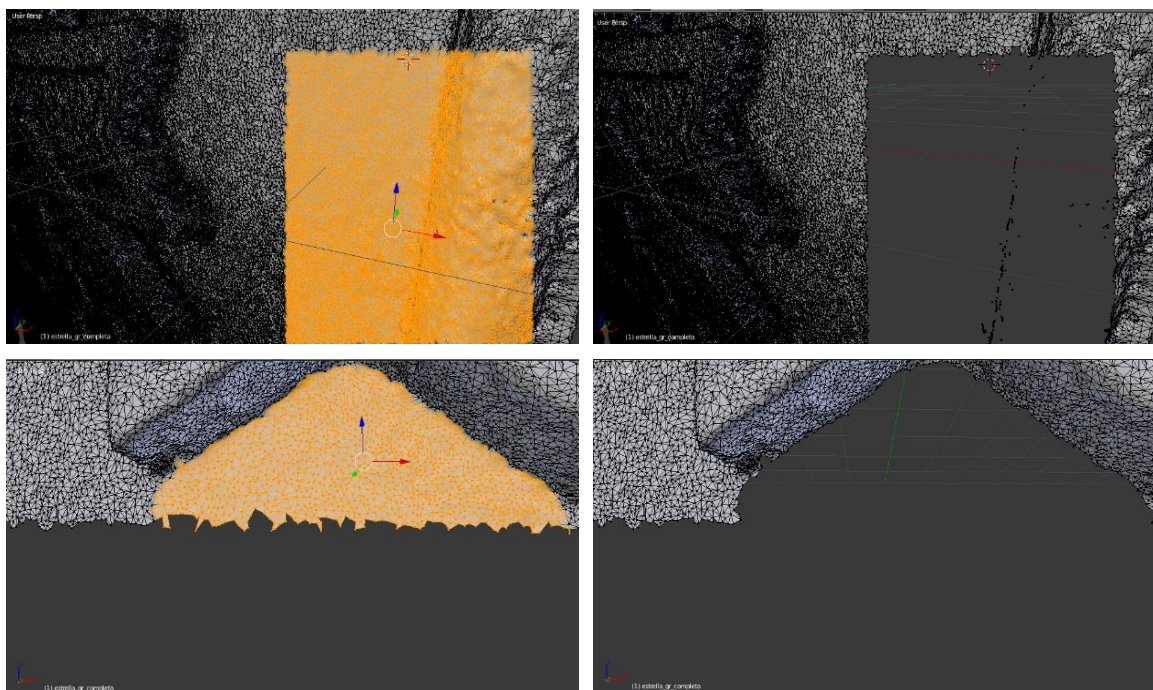


Fig. 540 A la izquierda aparecen numerosos triángulos seleccionados (en amarillo) para ser eliminados del modelo, tal y como puede apreciarse a la derecha. Toda aquella geometría correspondiente a la pared (también fotografiada e incluida en el modelo fotogramétrico), no forma parte de la propia estrella por lo que fue eliminada. ©María Ávila Rodríguez.

Cuando toda la geometría referente al fondo había sido eliminada del modelo, la edición del mismo había concluido y se guardó el archivo en .obj y en .blend.

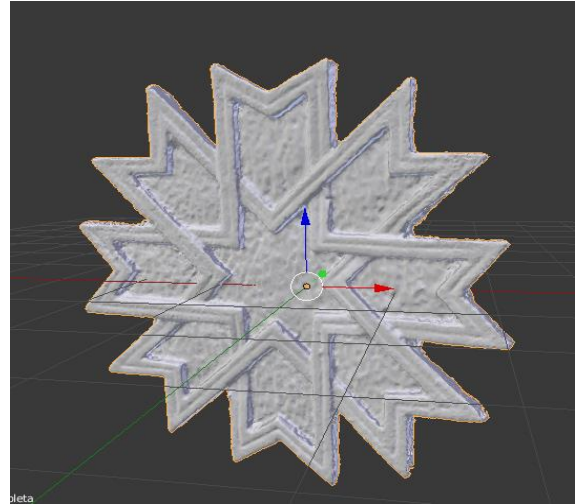


Fig. 541 Modelo de la estrella grande completa limpio. ©María Ávila Rodríguez.

9. 2. 3. 1. 2 Creación y edición del modelo de la estrella pequeña completa



Fig. 542 Creación del modelo de la estrella pequeña completa: a) nube de puntos; b) malla; c) modelo con textura y d) visualización del modelo en wireframe. ©María Ávila Rodríguez.

Una vez obtenido el modelo, este se exportó como .obj para abrirlo con Blender y poder así editarlo.

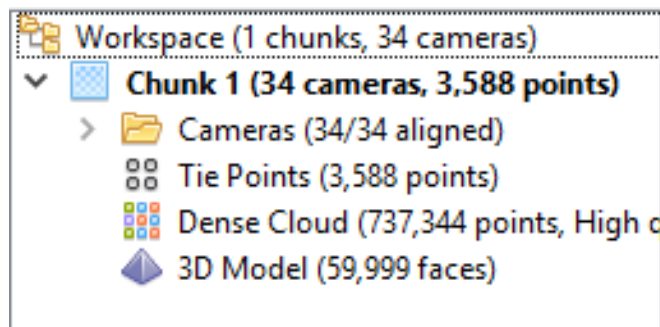


Fig. 543 Información referente al modelo. ©María Ávila Rodríguez.

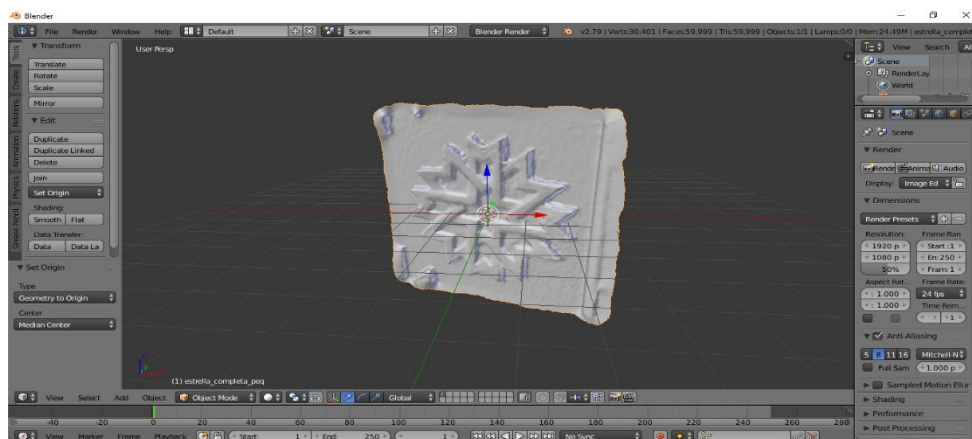


Fig. 544 Modelo abierto en Blender listo para comenzar su edición. ©María Ávila Rodríguez.

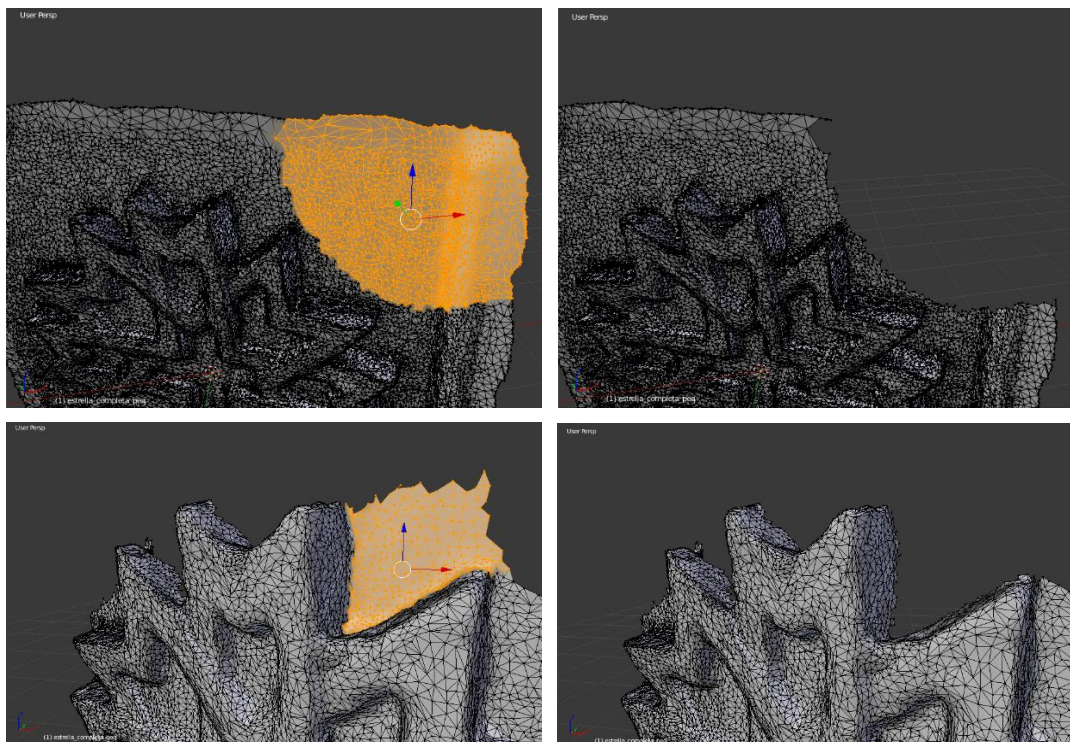


Fig. 545 A la izquierda aparecen numerosos triángulos seleccionados (en amarillo) para ser eliminados del modelo, tal y como puede verse a la derecha. Toda aquella geometría correspondiente a la pared (también fotografiada e incluida en el modelo fotogramétrico), no forma parte de la propia estrella por lo que fue eliminada. ©María Ávila Rodríguez.

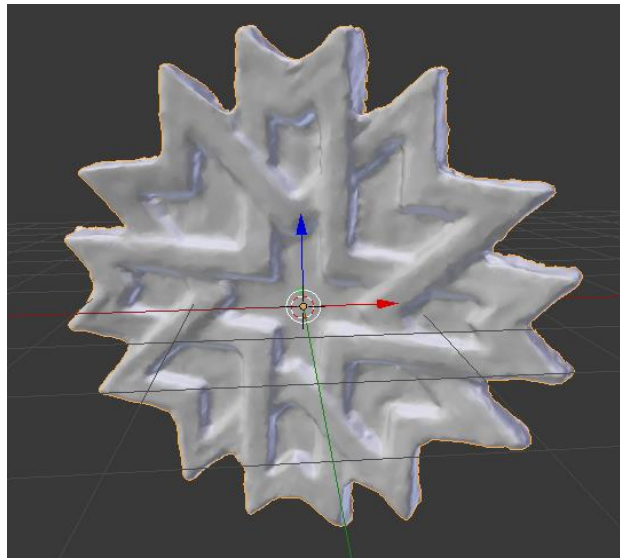


Fig. 546 Modelo de la estrella pequeña completa listo.
©María Ávila Rodríguez.

9. 2. 3. 1. 3 Creación y edición del modelo de la estrella nº1

En este caso se seleccionó, antes de alinear las imágenes, la zona en la que aparecía el único fragmento existente de la pieza de cada fotografía. La versión de Photoscan en este caso se había actualizado y en lugar del lazo se empleaba un seleccionador que marcaba la zona escogida con forma cuadrangular. Es más rápido de usar que el lazo, sin embargo, permite una menor discriminación de las zonas que no interesan para el modelo.

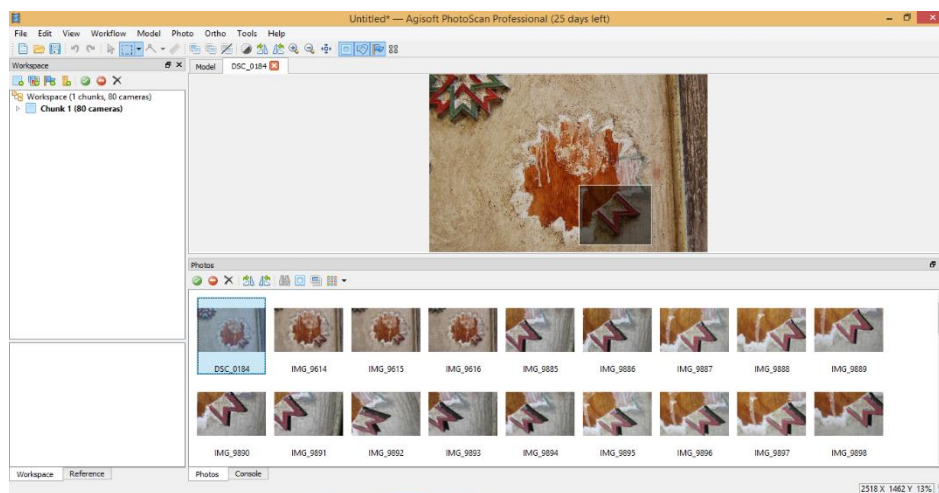


Fig. 547 En la imagen aparece el proceso de selección de la zona de interés para la creación del modelo en una de las fotografías. ©María Ávila Rodríguez.

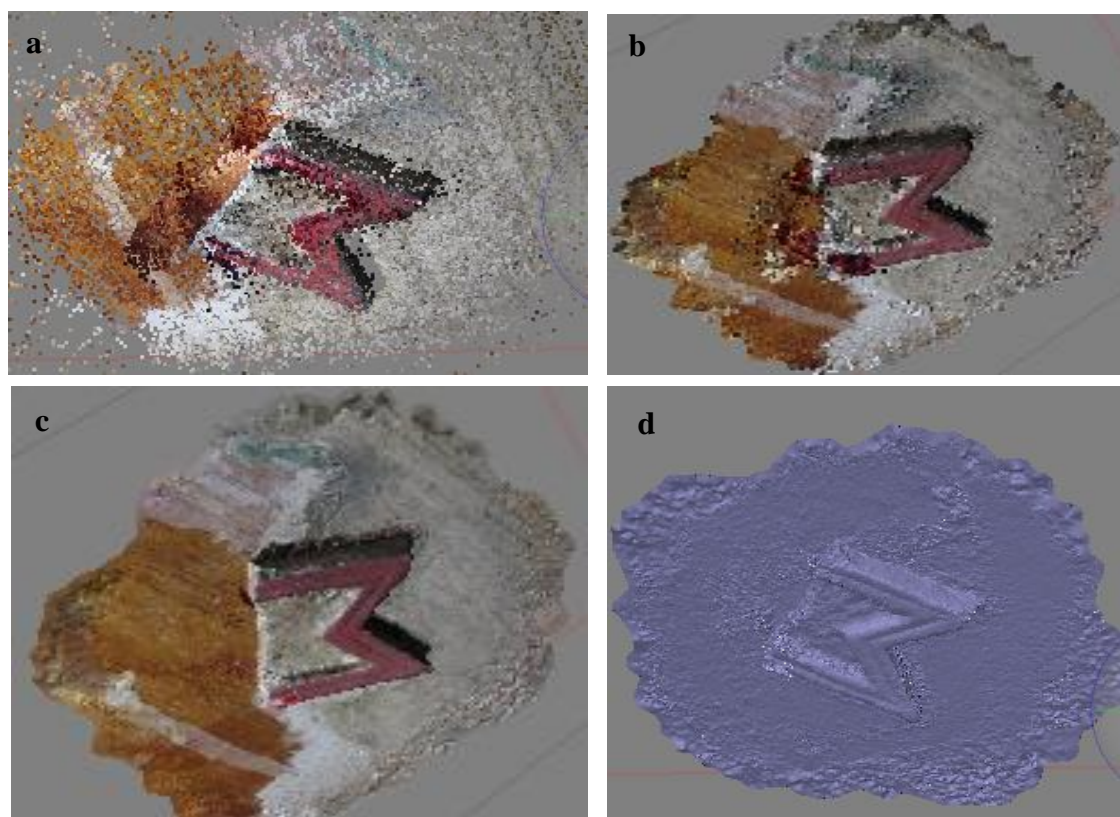


Fig. 548 Creación del modelo de la estrella nº 1: a) nube de puntos; b) malla; c) modelo con textura y d) visualización del modelo en wireframe. ©María Ávila Rodríguez.

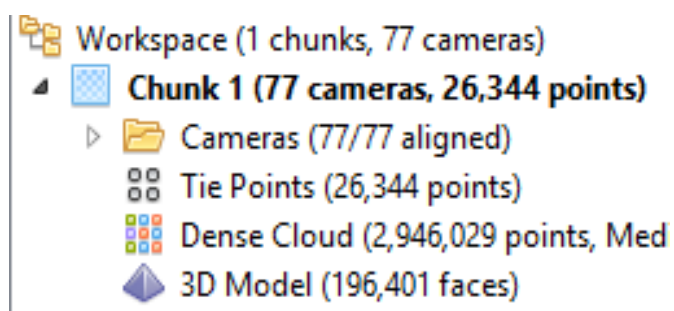


Fig. 549 Información referente al modelo. ©María Ávila Rodríguez.

Una vez se tenía el modelo, este se exportó como .obj para abrirlo con Blender y poder así editarlo.

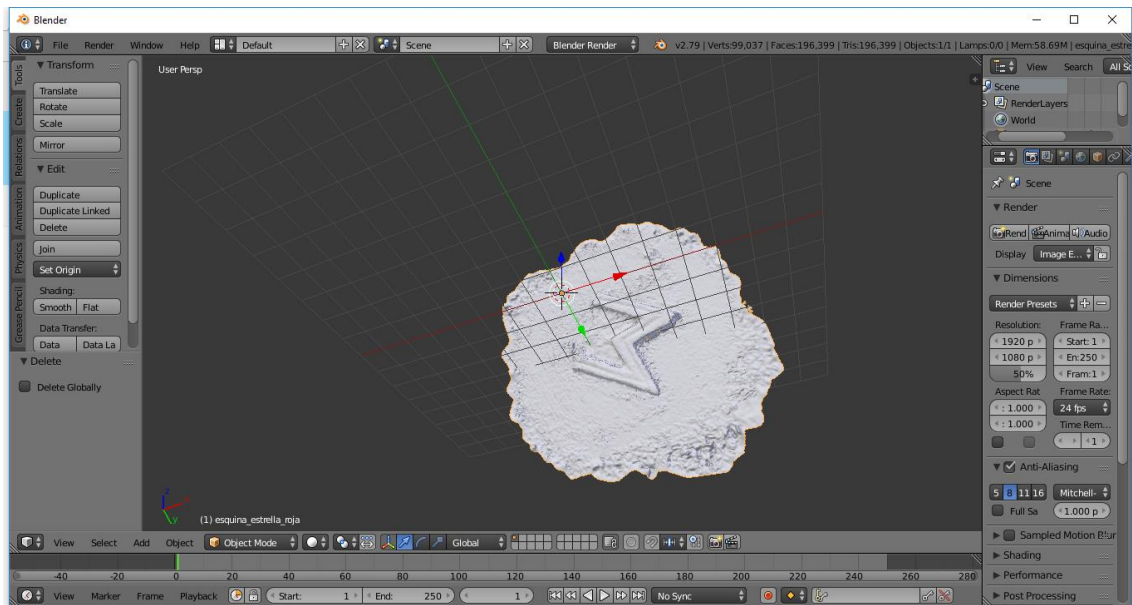


Fig. 550 Modelo abierto en Blender listo para comenzar su edición. ©María Ávila Rodríguez.

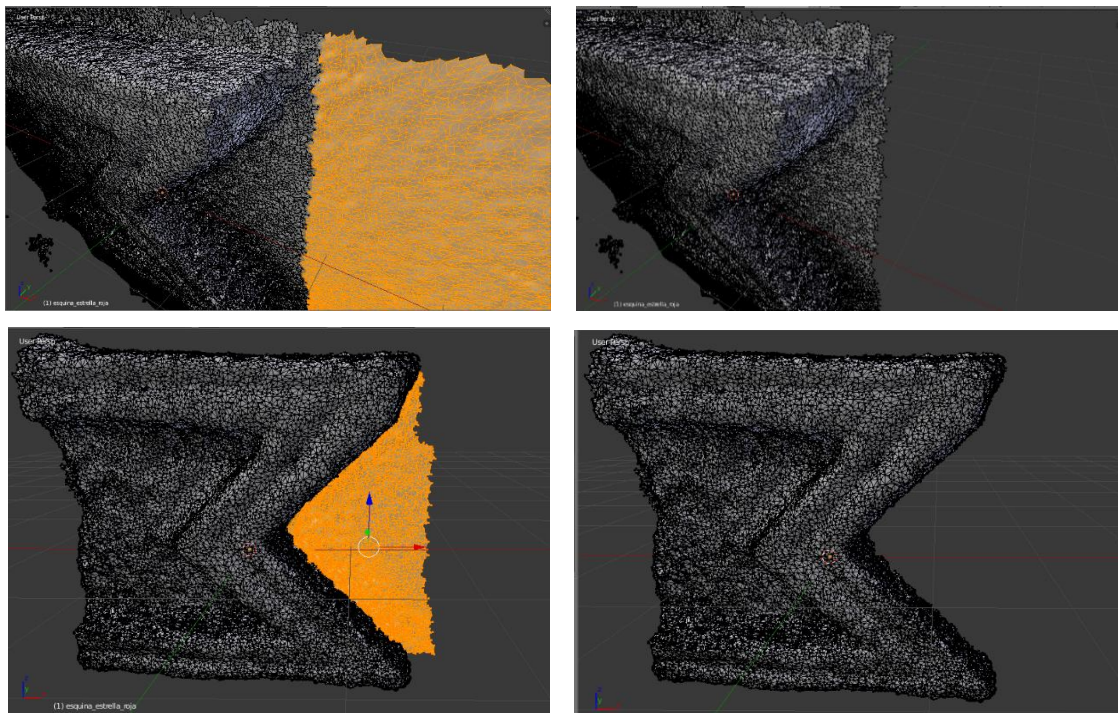


Fig. 551 A la izquierda aparecen numerosos triángulos seleccionados (en amarillo) para ser eliminados del modelo, tal y como puede verse a la derecha. Toda aquella geometría correspondiente a la pared (también fotografiada e incluida en el modelo fotogramétrico), no forma parte de la propia estrella, por lo que fue eliminada. ©María Ávila Rodríguez.

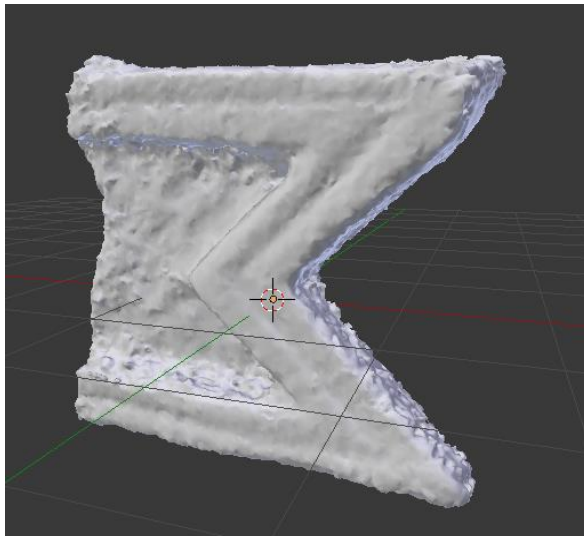


Fig. 552 Modelo de la estrella nº 1 limpio.
©María Ávila Rodríguez.

9. 2. 3. 1. 4 Creación y edición del modelo de la estrella nº2



Fig. 553 Creación del modelo de la estrella nº 2: a) nube de puntos; b) malla; c) modelo con textura y d) visualización del modelo en wireframe. ©María Ávila Rodríguez.

Una vez se tenía el modelo, este se exportó como .obj para abrirlo con Blender y poder así editarlo.

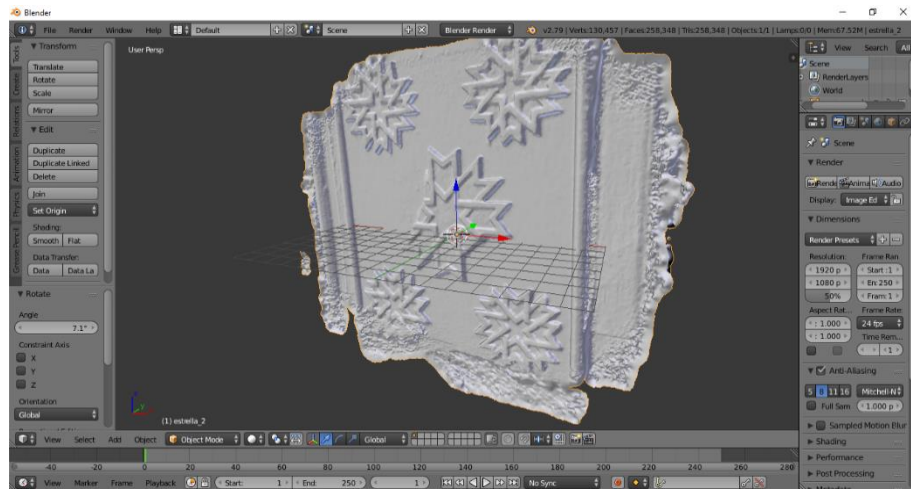


Fig. 554 Modelo abierto en Blender listo para su edición. ©María Ávila Rodríguez.

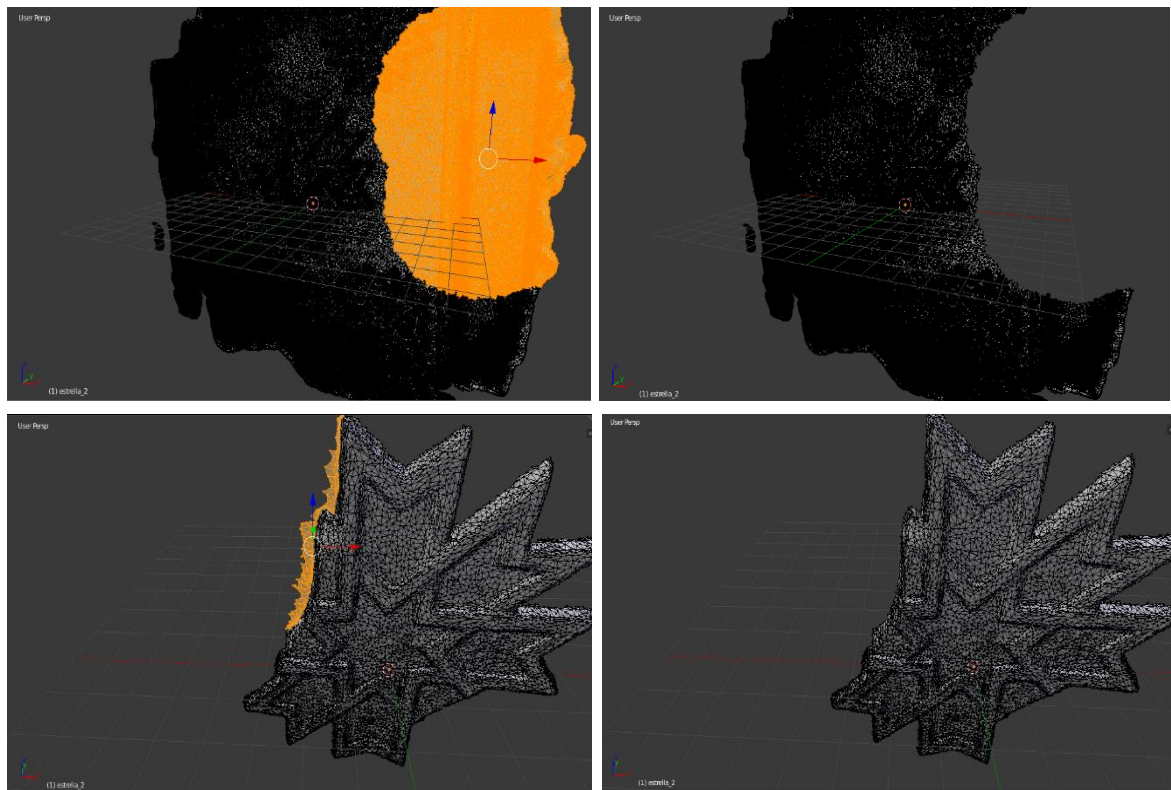


Fig. 555 A la izquierda aparecen numerosos triángulos seleccionados (en amarillo) para ser eliminados del modelo, tal y como puede verse a la derecha. Toda aquella geometría correspondiente a la pared (también fotografiada e incluida en el modelo fotogramétrico), no forma parte de la propia estrella, por lo que fue eliminada. ©María Ávila Rodríguez.

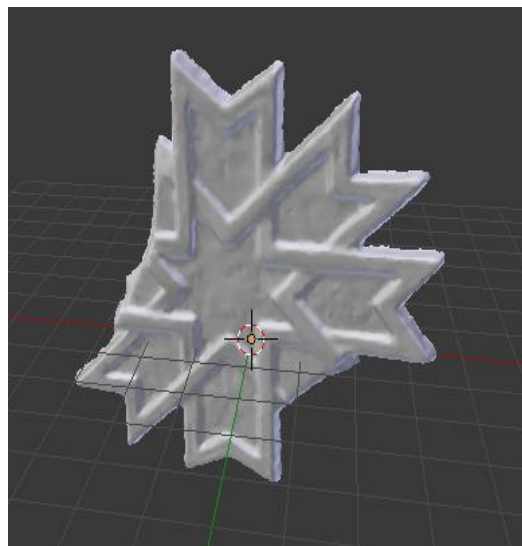


Fig. 556 Modelo de la estrella nº 2 limpio.
©María Ávila Rodríguez.

9. 2. 3. 1. 5 Creación y edición del modelo de la estrella nº3

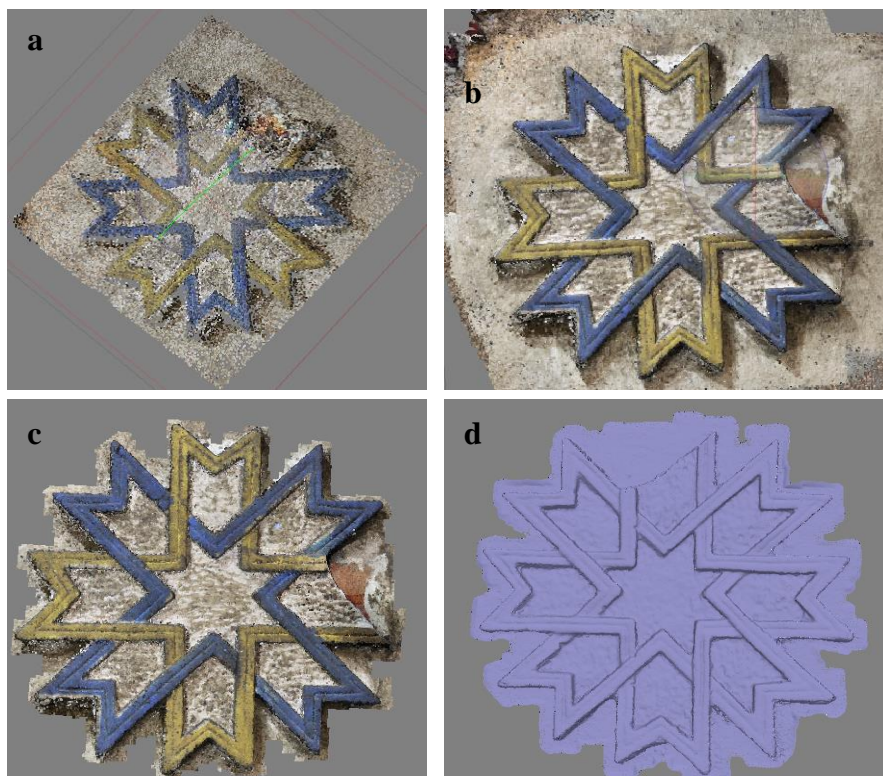


Fig. 557 Creación del modelo de la estrella nº 3: a) nube de puntos; b) malla; c) modelo con textura y d) visualización del modelo en wireframe. ©María Ávila Rodríguez.

De nuevo, una vez se dispuso del modelo 3D, este fue exportado como .obj para abrirlo con Blender y poder así editarlo.



Fig. 558 Detalle ampliado de la zona donde se produjo la rotura de la pieza. Gracias a las numerosas fotografías tomadas con la lente que se instaló en el dispositivo móvil, puede apreciarse la calidad del modelo obtenido. ©María Ávila Rodríguez.

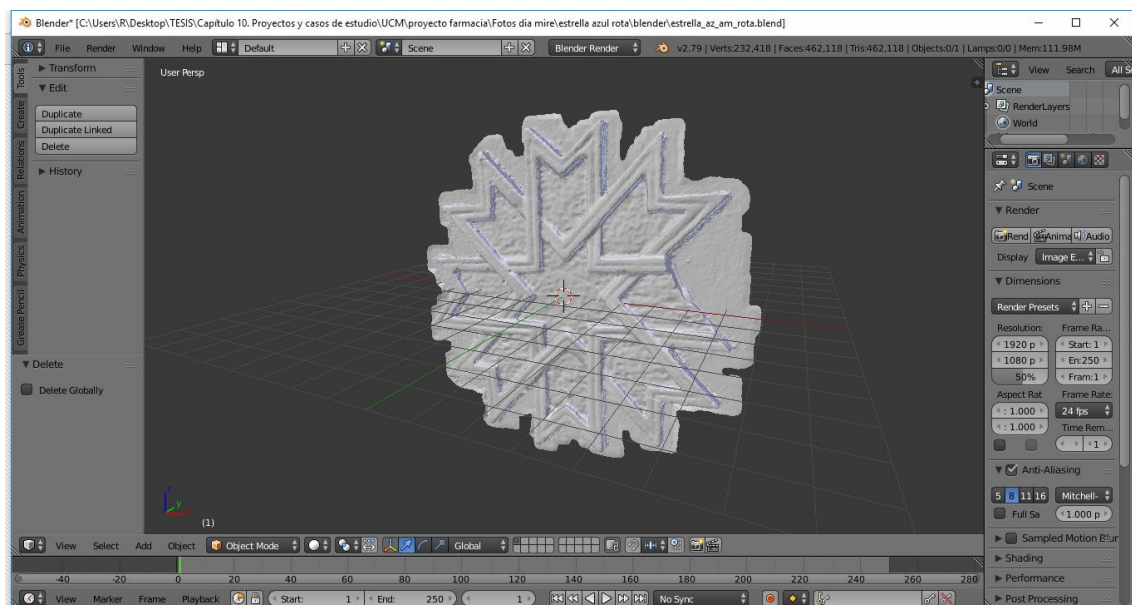


Fig. 559 Modelo abierto en Blender y listo para comenzar su edición. ©María Ávila Rodríguez.

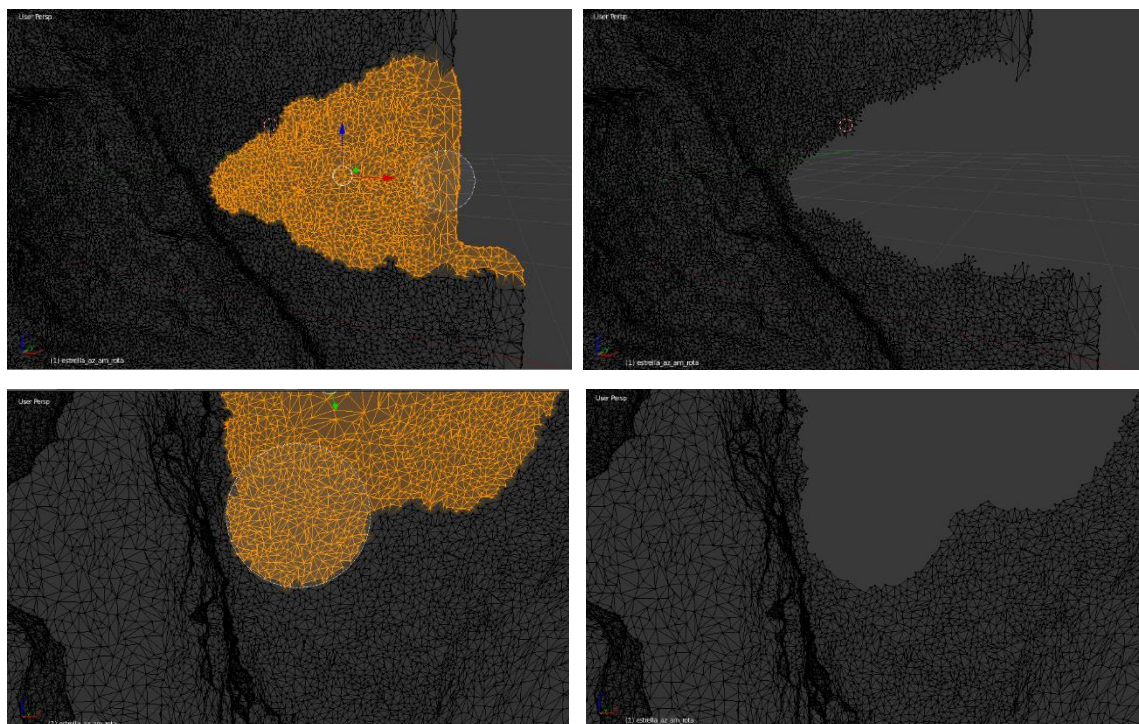


Fig. 560 A la izquierda aparecen numerosos triángulos (en amarillo) seleccionados para ser eliminados del modelo, tal y como puede apreciarse a la derecha. Toda aquella geometría correspondiente a la pared (también fotografiada e incluida en el modelo fotogramétrico) no forma parte de la propia estrella, por lo que fue eliminada. ©María Ávila Rodríguez.

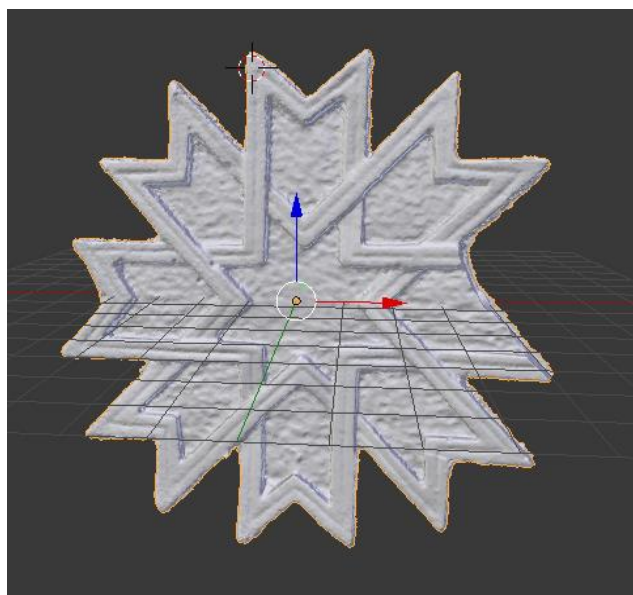


Fig. 561 Modelo de la estrella nº3 limpio. ©María Ávila Rodríguez.

9. 2. 3. 2 Restauración virtual de las piezas

Una vez se dispuso de todas las piezas digitalizadas, se procedió a la restauración virtual de las mismas mediante la reintegración de sus faltas volumétricas. Para ello fue necesario, tal y como se verá en próximas líneas, el modelo 3D de la estrella completa, que sería esencial para completar las pérdidas del resto de los modelos 3D generados a partir de las estrellas nº1, nº2 y nº3.

Este modelo debía estar escalado conforme a sus medidas reales, puesto que las piezas obtenidas con la restauración virtual serían impresas para restaurar físicamente las estrellas. El modelo tendría que medir de alto 13,30.

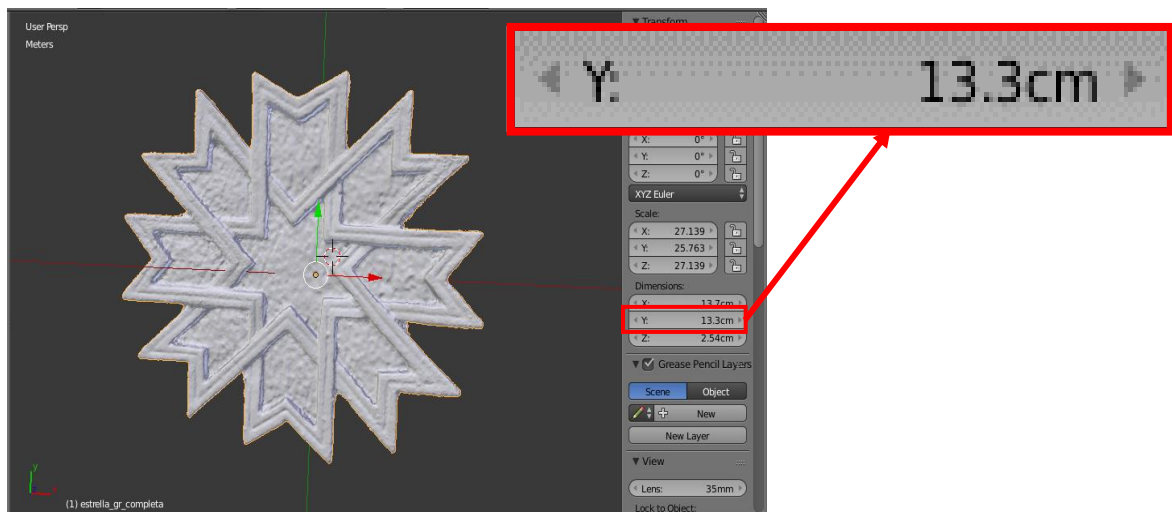


Fig. 562 La estrella grande completa con las medidas de 13,30 cm en las dimensiones de su eje Y, es decir en su altura. De este modo se aseguró que la pieza tuviese las medidas reales. ©María Ávila Rodríguez.

Debe indicarse que, en cada uno de los modelos a continuación creados, se añadió en la zona de junta con el original unos milímetros a la pieza para trabajar con margen y poder retocar el modelo 3D conforme fuera necesario, de modo que no faltase volumen a la zona y descartando posibles fallos que pudiesen generarse durante el proceso de su materialización.

9. 2. 3. 2. 1 Restauración virtual de la pieza nº1

La estrella nº1 era, como ya ha sido indicado en líneas anteriores, la que peor estado de conservación presentaba, puesto que únicamente se conservaba una de sus puntas.

Para restaurarla virtualmente, se abrió su modelo 3D, ya editado, en Blender, y se importó también el .obj del modelo de la estrella grande completa. Para diferenciar ambos modelos a fin de facilitar las operaciones, se aportó color al modelo de la estrella nº1.

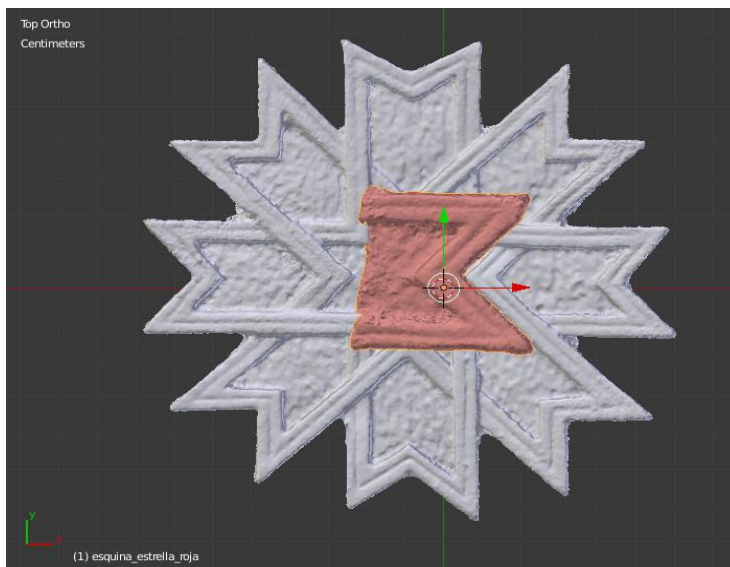


Fig. 563 En tono rosa aparece el modelo de la estrella nº1 y en blanco el de la estrella completa, necesario para la restauración de esta. ©María Ávila Rodríguez.

Durante el proceso de reconstrucción virtual, se abrió una fotografía de la estrella nº1 con el fin de tener también la referencia visual de la restauración virtual. El modelo de la estrella nº1 (rosa) fue escalada al tamaño de la estrella completa (blanca), hasta que encajó perfectamente en la posición donde debía ir situada.

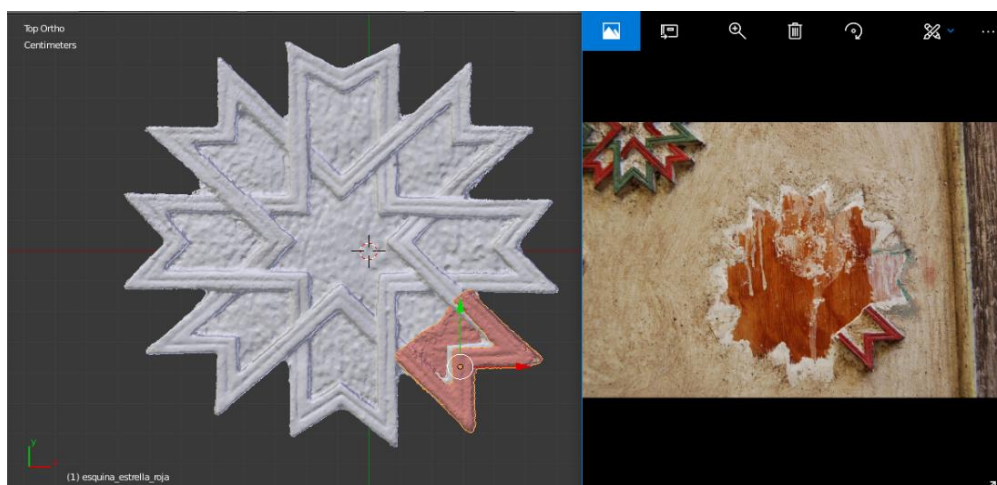


Fig. 564 A la izquierda, ambos modelos: estrella completa (blanca) y estrella nº1 (rosa) siendo encajados. A la derecha la imagen que se abrió durante el proceso. ©María Ávila Rodríguez.

Con el modelo de la estrella nº1 encajado perfectamente sobre la estrella blanca, se procedió a eliminar toda la superficie que ocupaba el modelo de la estrella nº1, con el fin de obtener así, todo el volumen faltante en el original. Para ello se trabajaba continuamente dando la vuelta a la pieza, viendo anverso y reverso y conseguir así eliminar correctamente la geometría sobrante.

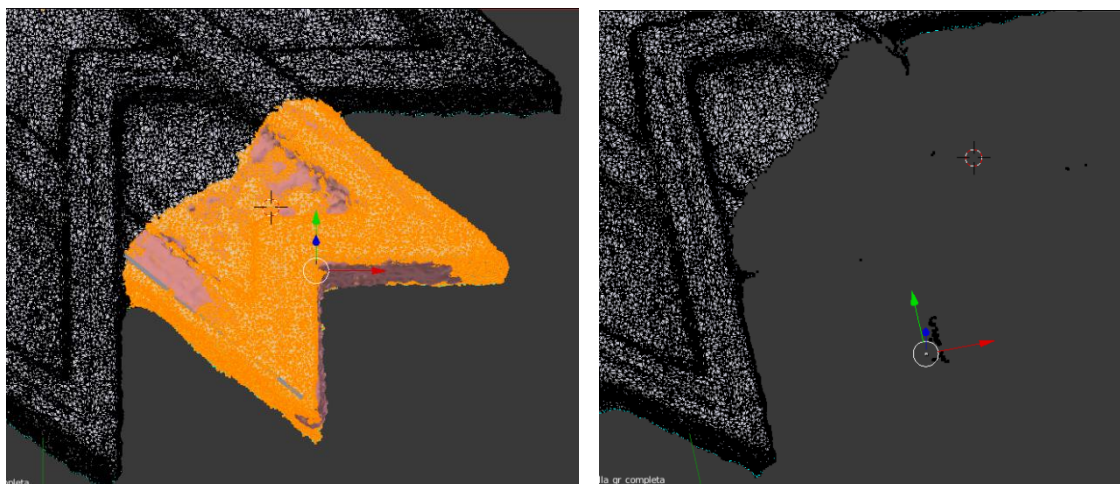


Fig. 565 A la izquierda puede verse la zona de la estrella completa ocupada por la estrella nº1 (rosa), que sería eliminada. Para ello se seleccionaron los triángulos de esa zona, lo cual aparece en amarillo en la imagen, y a su derecha han sido ya eliminados, junto con el modelo de la estrella nº1. ©María Ávila Rodríguez.

Se obtuvo así, finalmente, el volumen necesario para reintegrar la estrella nº1.

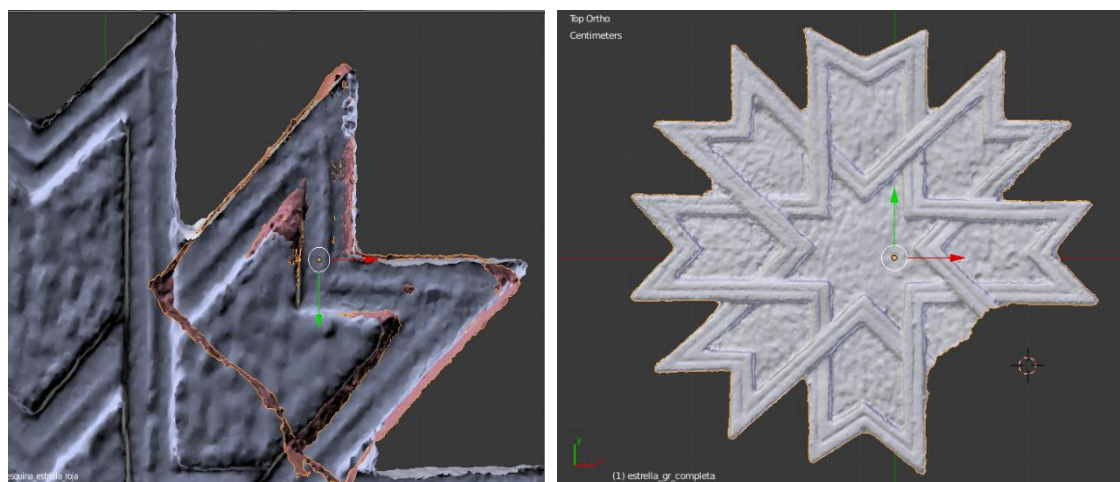


Fig. 566 A la izquierda las piezas vistas desde atrás donde se marcaba la zona de junta de un modelo con otro. A la derecha, la pieza de la estrella que debía emplearse en la restauración de la estrella nº1 original. ©María Ávila Rodríguez.

9. 2. 3. 2. 2 Restauración virtual de la pieza nº2

Para restaurar virtualmente la estrella nº2, se abrió en Blender su modelo 3D ya editado y se importó también, igual que en el caso anterior, el .obj del modelo de la estrella grande completa. Para diferenciar ambos modelos a fin de facilitar las operaciones, se aportó color al modelo de la estrella nº2.

El modelo de la estrella nº2 (rosa) se escaló al tamaño de la estrella completa (blanca), hasta que encajaó perfectamente en la posición donde debía ir situada.

Con el modelo de la estrella nº2 encajado sobre la estrella blanca, se procedió a eliminar toda la superficie que ocupaba en modelo de la estrella nº2, con el fin de obtener así, todo el volumen faltante en el original, es decir sus puntas 3, 4 y 8.

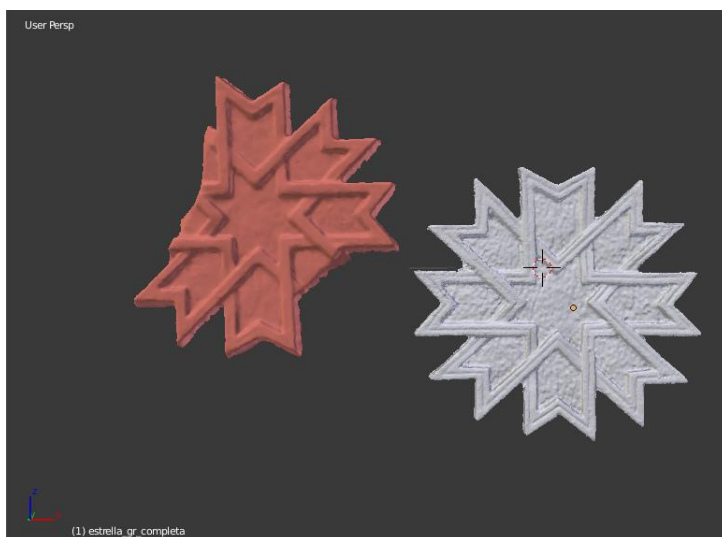


Fig. 567 En tono rosa aparece el modelo de la estrella nº2 y en blanco el de la estrella completa, necesario para la restauración de esta. ©María Ávila Rodríguez.

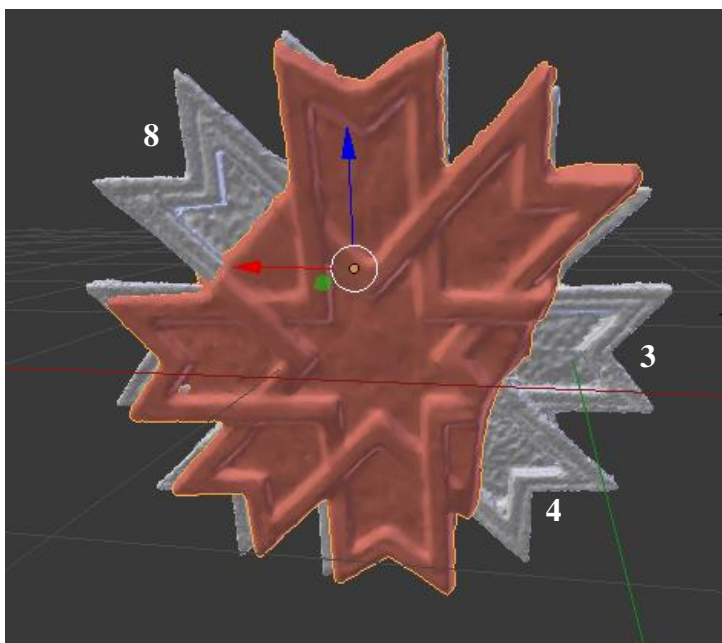


Fig. 568 Ambos modelos, estrella completa (blanca) y estrella nº2 (rosa) siendo encajados. ©María Ávila Rodríguez.

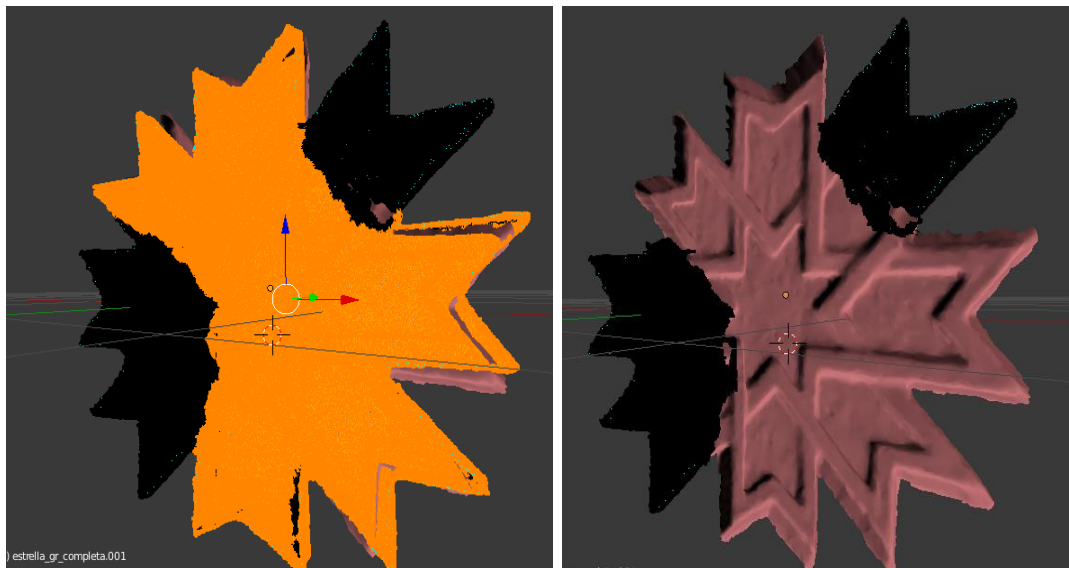


Fig. 569 A la izquierda puede verse la zona de la estrella completa ocupada por la estrella nº2 (rosa), que sería eliminada. Para ello se seleccionaron los triángulos de esa zona, lo cual aparece en amarillo en la imagen, y a su derecha han sido ya eliminados, juntos con el modelo de la estrella nº2. En ambas imágenes las estrellas están siendo editadas vistas desde atrás. ©María Ávila Rodríguez.

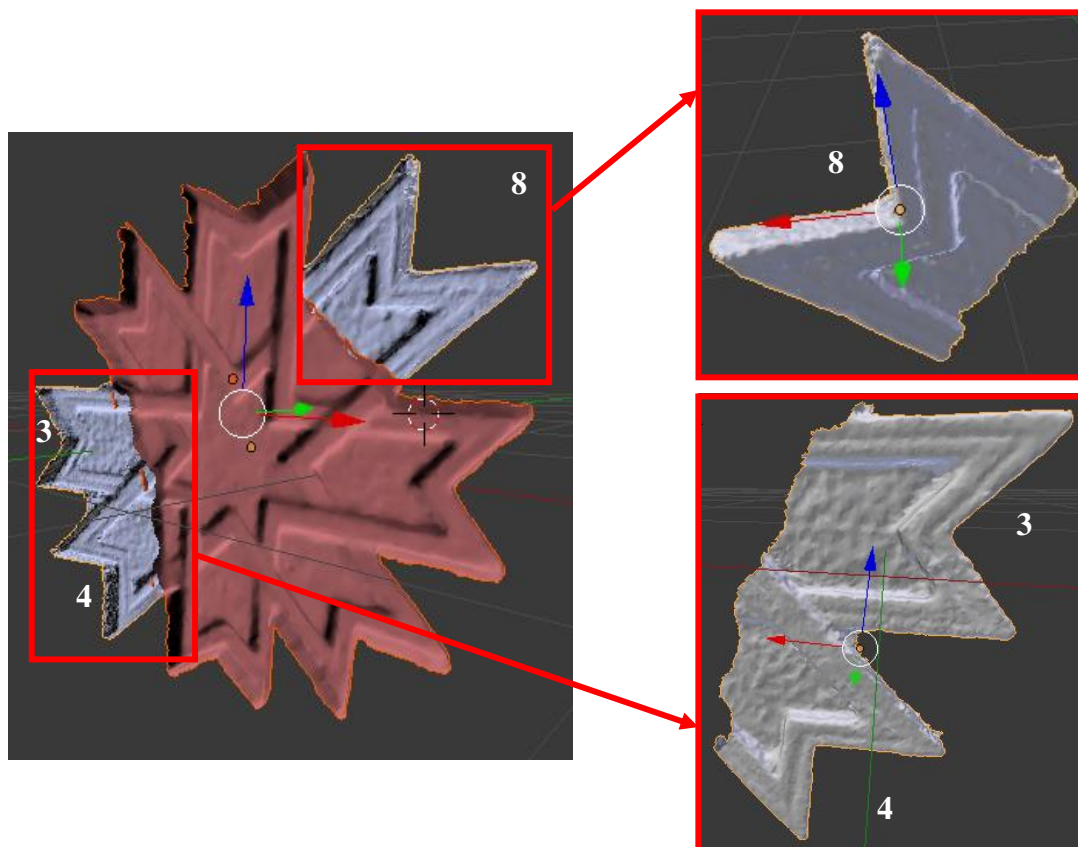


Fig. 570 A la izquierda aparece la estrella nº2 (rosa) vista desde atrás y en blanco lo que había quedado de la estrella completa tras borrar el resto de la geometría. A la derecha pueden verse las dos piezas (punta 8 y las puntas 3 y 4 unidas) que debían emplearse en la restauración de la estrella nº2 original. ©María Ávila Rodríguez.

9. 2. 3. 2. 3 Restauración virtual de la pieza nº3

Siguiendo la metodología anterior, para restaurar virtualmente la estrella nº3, se abrió en Blender su modelo 3D, ya editado. En este caso no fue necesario importar, tal y como ocurría en los casos anteriores, el .obj del modelo de la estrella grande completa, puesto que la falta de la estrella era de un tamaño muy reducido en comparación con lo que ocurría en las otras dos estrellas. Por ello, en este caso se empleó la propia estrella para reintegrar la falta existente y antes de realizar cualquier operación, se escaló la estrella al tamaño necesario, tal como se hizo anteriormente con la estrella completa, hasta conseguir que su eje “y” midiese 13,30 cm, de modo que el modelo y la realidad tuviesen las mismas medidas. Una vez la estrella estaba escalada conforme a la realidad, esta se duplicó y se le aportó a una de ellas una coloración rojiza para diferenciarla de su duplicado a fin de facilitar las operaciones que debían realizarse.

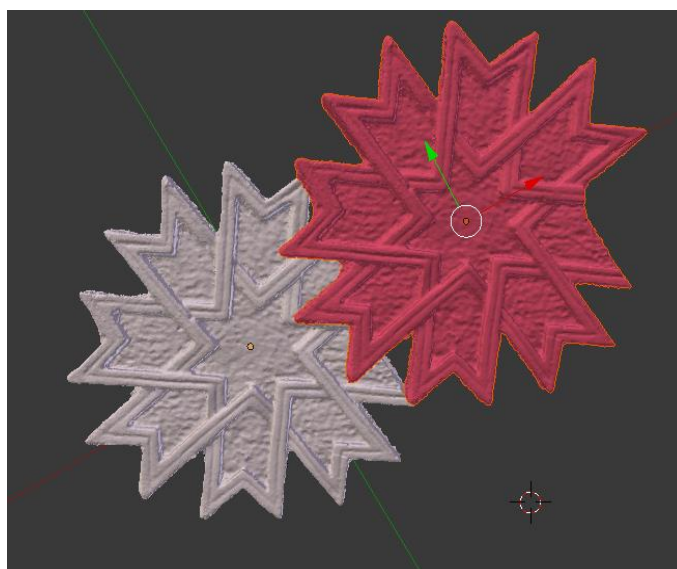


Fig. 571 Estrella nº3 duplicada. A la izquierda aparece la que se editaría y a la derecha la que se mantendría intacta. ©María Ávila Rodríguez.

Con ambas estrellas listas, se colocó la rojiza sobre la blanca y se encajaron, para posteriormente rotar ligeramente la blanca, hasta conseguir que su punta 2 ocupase el hueco vacío de la punta 3.

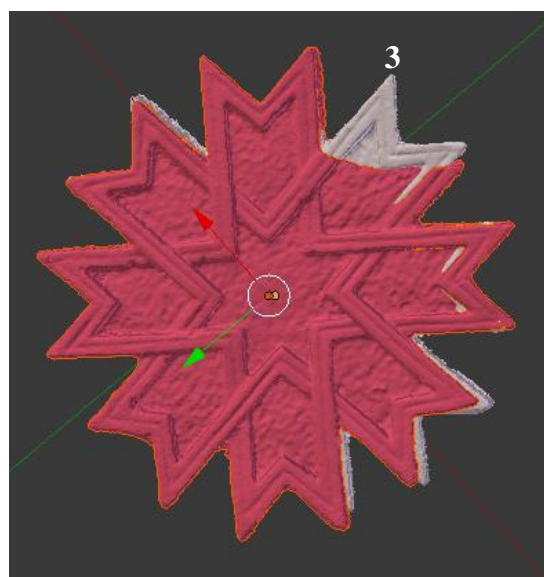


Fig. 572 En la imagen pueden observarse ambas estrellas y la punta 2 de la estrella blanca reintegrando la punta 3 de la estrella rojiza. ©María Ávila

Se escaló la estrella blanca hasta conseguir que encajase con el hueco que la punta 3 debía ocupar. Entonces se pudo, tal y como se procedió en los casos anteriores, borrar el resto de la geometría de la estrella blanca.

Fig. 573 Punta 3 de la estrella nº3 escalada para que encajase con el modelo y reintegrarse de este modo la falta volumétrica. ©María Ávila Rodríguez.

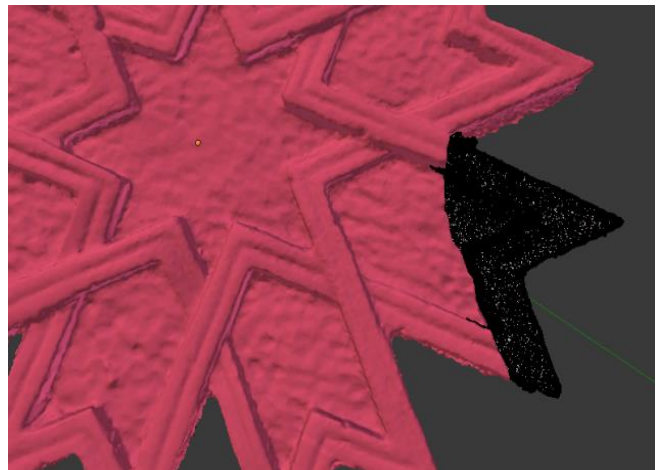
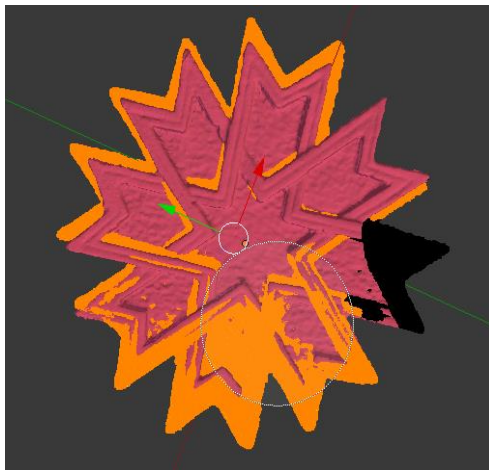
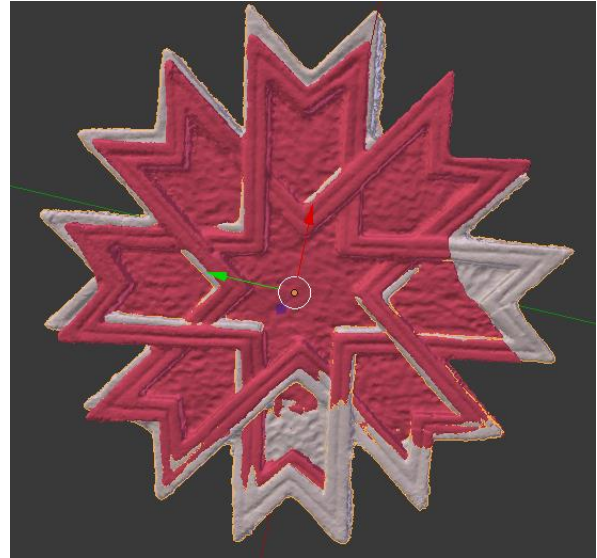


Fig. 574 A la izquierda aparece señalada en amarillo toda la zona de la malla de la estrella blanca que se iba a eliminar para conseguir solo la punta 3 que reintegraría la estrella nº3. A la derecha la malla ya había sido eliminada y puede verse como, del modelo blanco, solo quedaba la punta 3. ©María Ávila Rodríguez.

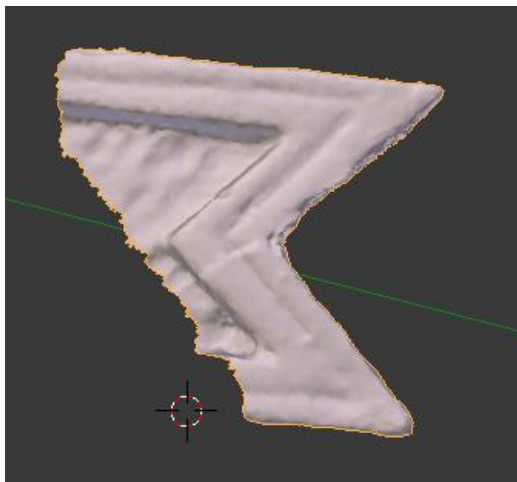


Fig. 575 Punta 3 que debía emplearse en la restauración de la estrella nº3 original. ©María Ávila Rodríguez.

9. 2. 3. 3 Impresión de las piezas

Una vez los archivos de las puntas de las estrellas estuvieron listos para su impresión, se llevaron al Laboratorio de Morfología Virtual del CSIC, dirigido por el doctor Markus Bastir, para proceder a su impresión.

A cada una de las piezas impresas se las denominará de ahora en adelante, con el fin de facilitar la lectura, de la siguiente manera:

- Pieza nº1 de la estrella nº1 original: Pieza 1.
- Punta 8 de la estrella nº2 original: Punta 2a.
- Puntas 3 y 4 unidas, de la estrella nº2 original: Punta 2b.
- Punta 3 de la estrella nº3 original: Punta 3.



Fig. 576 Las imágenes muestran fotografías de las estrellas originales reintegradas virtualmente con las piezas (en blanco) creadas para su posterior reintegración física. ©María Ávila Rodríguez.

En este punto, la colaboración de Francisco Javier Fernández Pérez, técnico del laboratorio virtual encargado de digitalizar e imprimir las piezas del mismo, fue imprescindible, puesto que fue el encargado de materializar los archivos que reintegrarían las estrellas. Dos fueron las impresoras que empleó para la materialización de las piezas: MakerBot Replicator 2, cuyas especificaciones fueron revisadas en el apartado 9.1 del presente capítulo y la Ultimaker 3 Extended.

Por lo que a la impresora Ultimaker 3 Extended respecta, debe decirse que es una impresora 3D de gran formato con doble extrusor, que permite fabricar objetos con materiales como Nylon, PLA, ABS o CPE y soportes con material PVA soluble en agua. Cuenta con una bandeja de impresión de 215 x 215 x 300 mm, por lo que el límite para las medidas de las impresiones es de 197x215x300mm con doble material (Tr3sdland, s.f.)

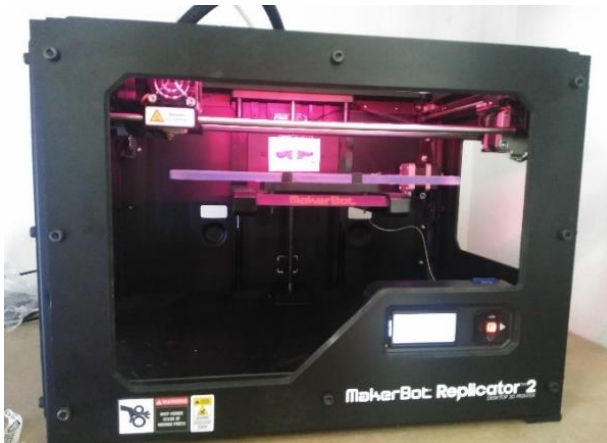


Fig. 577 Impresoras del CSIC: a la izquierda la impresora MakerBot Replicator 2 y a la derecha la impresora Ultimaker Extender 3. ©María Ávila Rodríguez.

De este modo, la primera pieza en ser impresa, por su menor tamaño, fue la punta 3 y fue materializada por medio de la impresora MakerBot Replicator 2, mientras que las otras tres piezas, la nº 1 y las puntas 2a y 2b, fueron materializadas en la Ultimaker 3 Extended.

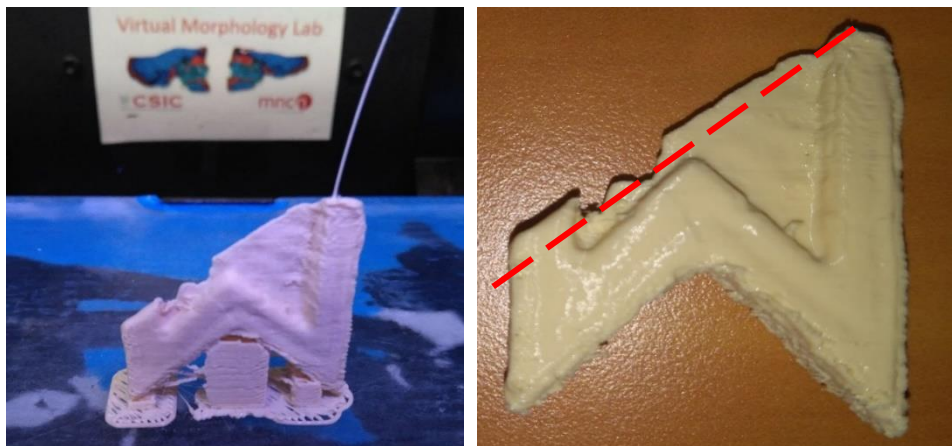


Fig. 578 A la izquierda, la pieza de la punta 3 impresa por completo, aún en la impresora. A la derecha la pieza limpia de los soportes de impresión. El material de impresión de soporte es el mismo que el de la pieza, por lo que es rígido. Para eliminarlo, se emplearon tenacillas. La línea roja muestra la zona que se añadió para trabajar con mayor margen. © Francisco Javier Fernández Pérez.



Fig. 579 Puntas 2b y 2a, impresas y aún con los soportes. En este caso, los soportes eran solubles en agua por lo que bastó con sumergir las piezas en el líquido para su eliminación. Francisco Javier Fernández Pérez.



Fig. 580 Pieza 1 impresa y con los soportes ya eliminados tras sumergir la pieza en agua. Francisco Javier Fernández Pérez

9. 2. 3. 4 Moldeo y vaciado de las piezas impresas

Cuando todas las piezas habían sido impresas y ya carecían de sus soportes, se acudió al Museo de Farmacia para comprobar que estas encajaban perfectamente con los originales a los que tendrían que reintegrar.

De este modo, con la seguridad de que todas las piezas encajaban correctamente, se procedió a moldearlas. Las piezas debían moldearse puesto que como ya ha sido introducido, no podía emplearse el PLA para reintegrar la pieza, siendo este un material plástico que puede afectar la integridad física de la obra.

Por ello, para la realización de los moldes se emplearía, una vez más, silicona RTV y resina. El procedimiento a seguir fue el mismo que el descrito en los casos anteriores, con la diferencia de que esta vez el molde realizado era de una sola pieza, puesto que se trataba de un relieve. No fue, por tanto, necesario registrar la parte de atrás de la pieza, lo que simplificó notablemente el proceso de realización del molde. Para comenzar a realizar éste, primeramente, se colocaron todas las piezas sobre una tabla de madera que constituyera la base del molde.

Dicha base se forró con plástico de polietileno para facilitar que la silicona se separase del tablero una vez curada. Cada estrella debía tener su perímetro sellado con plastilina, de modo que la silicona no se filtrase por debajo de la misma cuando se añadiese en estado líquido. Además, la plastilina sirvió para inmovilizar el modelo en el tablero de madera, fijándolo sobre el mismo.



Fig. 581 Comprobación *in situ* del encaje de la pieza 3. ©María Ávila Rodríguez.



Fig. 582 A la izquierda se aprecia el detalle de la plastilina colocada en las primeras puntas de la pieza. A la derecha, todo su perímetro había sido ya rodeado y sellado. ©María Ávila Rodríguez.

Cuando todos los perímetros de las piezas habían sido sellados, fue necesario construir con la misma plastilina un dique que bordease las piezas para contener la silicona.

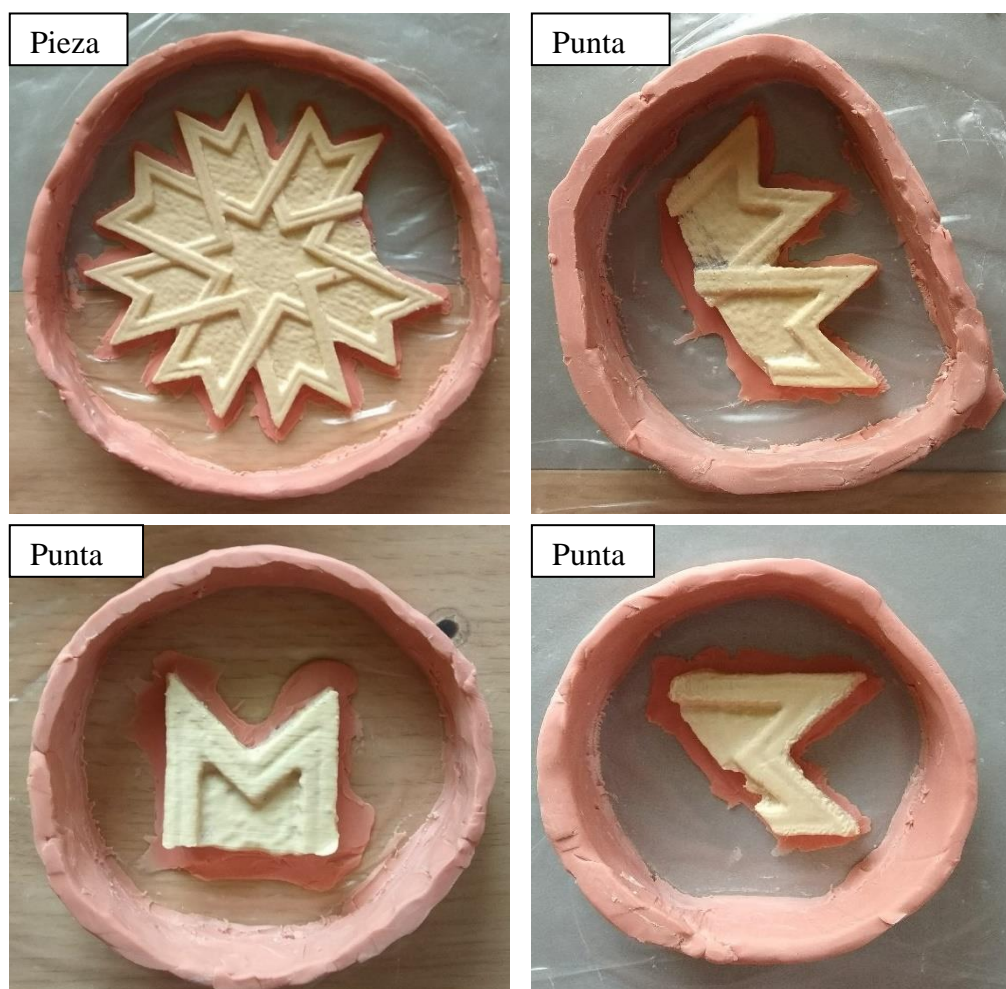


Fig. 583 Los 4 encofrados listos para recibir la silicona. ©María Ávila Rodríguez.

Cuando este paso se dio por finalizado, las piezas se limpiaron con un hisopo y una pequeña cantidad de etanol, con el fin de eliminar los restos grasos de la plastilina y la posible suciedad que hubiese manchado las piezas durante el proceso. Con las piezas completamente limpias y bien situadas, se preparó la silicona para realizar la primera y fina capa de registro, que se deja caer directamente sobre la mismas.

Para el proceso se empleó una silicona bicomponente de condensación con una viscosidad de 25000 mPa.s., lo suficientemente baja como para que tuviese una alta capacidad de registro de la textura de la superficie de la pieza. Como agente de curado se empleó un derivado del estaño, con un tiempo de trabajo de 90 a 120 minutos y un tiempo de curado de 24 horas (Santos, 2017a, p.104). Se empleó la silicona de Feroxa S.A., Silical 3481 y su agente de curado 81.

La silicona fue pesada junto con su agente de curado para mezclarla en la proporción indicada por el fabricante, 100:5, silicona base: agente de curado.

Una vez obtenida la mezcla, se aplicó sobre las piezas para conseguir una capa líquida de silicona. Se llenó así el encofrado con una primera y fina capa de silicona, de modo que constituyese la capa de registro. Debido a la sencilla morfología del molde, no sería necesario aplicar una carcasa de escayola tal y como se había trabajado en el cráneo de *Homo Naledi*, el *trolobite*, la *terra sigillata* y la antorcha.



Fig. 584 Aplicando la primera capa de registro sobre la pieza 1.
©María Ávila Rodríguez.

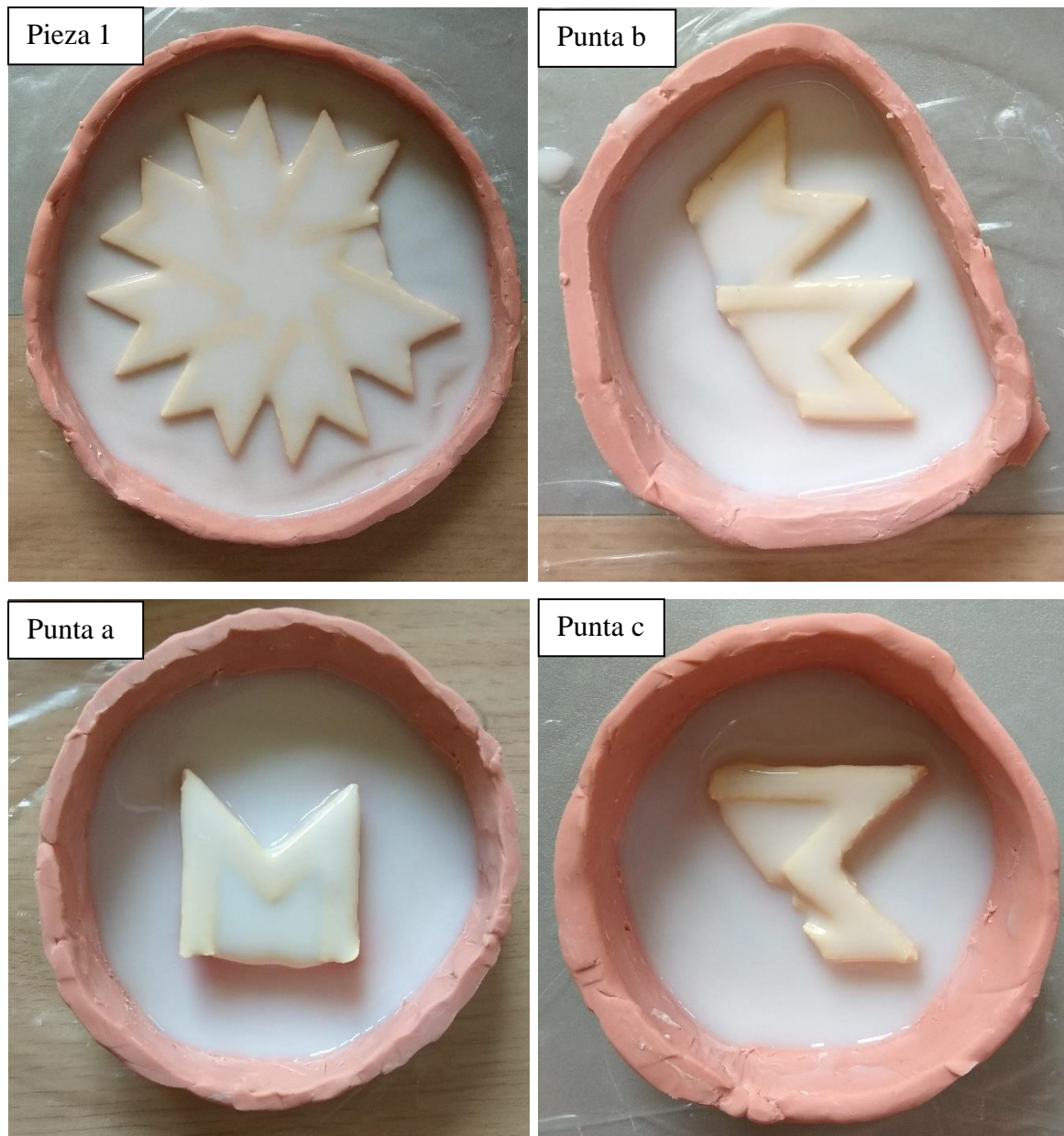


Fig. 585 Proceso de relleno de los encofrados con la silicona con la primera capa de silicona. ©María Ávila Rodríguez.

Con la primera capa de silicona ya curada, debía aplicarse una segunda capa para engrosar el molde puesto que era necesario para que este pudiese funcionar de manera adecuada. Esta segunda capa aportaría mayor consistencia al molde. En este caso, puesto que el molde era plano y la silicona no tenía que adaptarse a curvas ni desniveles, no se le añadió tixotrópico (recordando los moldes realizados en anteriores apartados). De este modo, únicamente se añadió una segunda capa de silicona, que tuviese, eso sí, alrededor de 2cm de grosor para aportar una consistencia suficiente al molde (tampoco iba a emplearse escayola).



Fig. 586 Los encofrados se rellenaron suficientemente con la silicona para conseguir un molde flexible con el grosor adecuado. En la secuencia de imágenes aparece la aplicación de la segunda capa de silicona al molde la pieza1. ©María Ávila Rodríguez.

Transcurridas las 24 horas que indicaba el fabricante, se dio la vuelta a los moldes para extraer las piezas y realizar los vaciados. Para ello, en primer lugar, debía retirarse la plastilina que había configurado los diques de los encofrados.



Fig. 587 A la izquierda retirando el dique de plastilina del molde. A la derecha el molde ya dado la vuelta, listo para extraer de él la pieza moldeada. ©María Ávila Rodríguez.

Una vez extraídas las piezas de los moldes, se eliminaron mecánicamente todos los restos de plastilina.



Fig. 588 A la izquierda la imagen muestra la extracción de la pieza 1 de su molde; a la derecha se eliminaban mecánicamente los restos de plastilina que fue empleada para bordear el perímetro de la pieza. ©María Ávila Rodríguez.

Para terminar de limpiar el molde, se empleó un algodón en seco y posteriormente se procedió a preparar la resina para realizar los vaciados de los moldes.



Fig. 589 Limpiando el molde de la pieza 1 con un algodón en seco. ©María Ávila Rodríguez.

La resina empleada fue, de nuevo, resina epoxídica Epofer EX402 con su endurecedor E-430, que presenta filtro UV que favorece la estabilidad de la reproducción y evita su amarilleamiento. Esta fue aplicada mezclada con pigmentos con el fin de que el color de los vaciados obtenidos se asemejase al del material original, la escayola. Para ello se aplicó pigmento blanco de titanio y una mínima cantidad de negro de carbón y sombra tostada.



Fig. 590 Aplicando la resina líquida sobre el molde de la pieza 1. ©María Ávila Rodríguez.

Cuando la resina había sido aplicada en todos los moldes, se dejó transcurrir las 72 horas que el fabricante indicaba tardaría la resina en endurecer. Después, pudieron extraerse de los moldes las piezas de resina que serían empleadas en las reintegraciones volumétricas de los originales

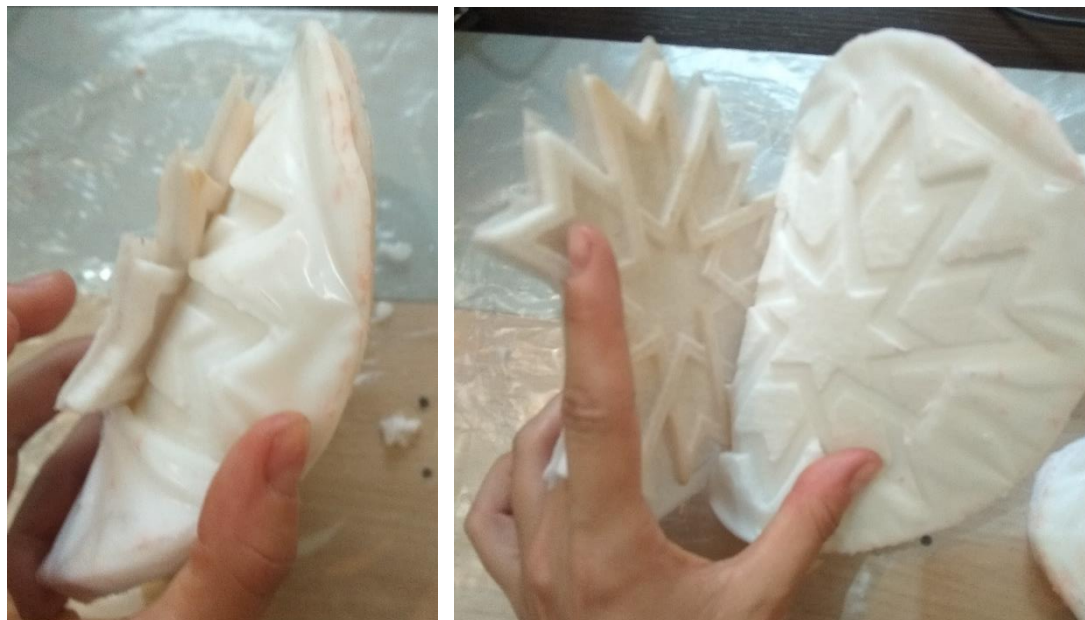


Fig. 591 Extrayendo la pieza 1 de su molde. ©María Ávila Rodríguez.



Fig. 592 Piezas extraídas de sus moldes. ©María Ávila Rodríguez.

Antes de situar las piezas en sus respectivas ubicaciones, se eliminaron las rebabas que el exceso de resina había generado. Para ello, se empleó bisturí.



Fig. 593 A la izquierda, la flecha señala una de las rebabas que iba a eliminarse con bisturí mientras que, a la derecha, la flecha señala el hueco libre dejado por la rebaba eliminada. ©María Ávila Rodríguez.

También fue necesario retocar la base de las piezas con microtorno y lijas, para que éstas se adaptasen perfectamente a la superficie donde iban a ser adheridas.

9. 2. 3. 5 Reintegración volumétrica física de los originales

Cuando todas las rebabas de las piezas habían sido eliminadas, se procedió a aportarles color base para no tener que manipularlas en exceso una vez se encontrasen junto a los originales ya adheridas.



Fig. 594 Aplicando color a la pieza 1. ©María Ávila Rodríguez.

Para la policromía se emplearon, una vez, colores Gamblin, por su especial estabilidad.



Fig. 595 Aplicando policromía a la pieza 1. ©María Ávila Rodríguez.

Una vez todos los vaciados hubieron sido policromados, fueron adheridos sobre su lugar correspondiente mediante el empleo de Paraloid B-72, preparado en acetona a una concentración del 70% como adhesivo. Éste fue aplicado con espátula de escultor sobre el reverso de los vaciados. De este modo, colocándolas en la posición adecuada, se sujetaron con cinta de carroceros para que se adhiriesen correctamente.



Fig. 596 A la izquierda, aplicando Paraloid B-72 en el reverso de la pieza 1. A la derecha Puntas 2a y 2b ya en su ubicación, adheridas con Paraloid B-72 y sujetas con la cinta de carroceros. ©María Ávila Rodríguez.

Se dejaron transcurrir 24 horas para asegurar que la acetona había evaporado por completo y las piezas se encontraban perfectamente adheridas, retirando entonces los trozos de cinta de carrocerero. Se comprobó que era necesario rellenar las juntas entre el original y el vaciado, puesto que, a pesar de tratarse de huecos milimétricos, si el visitante se acercaba a las piezas podrían ser apreciadas las separaciones entre originales y reintegraciones volumétricas. Además, si no se cerraban, en esos huecos se acumularía más polvo que en el resto de la pieza y en unos años es muy probable que se marcara aún más la diferencia. Por ello, se empleó estuco sintético para rellenar esas separaciones y se reintegró cromáticamente una vez seco el estuco, junto con aquellos puntos de las reintegraciones que así lo exigían.



Fig. 597 Retocando la policromía de la pieza, que había saltado en determinados puntos tras retirar la cinta de carrocerero. ©María Ávila Rodríguez.

9. 2. 3. 6 Resultados de la intervención

Dada la calidad del modelo obtenido con las fotografías tomadas con la lente que se instaló en el dispositivo móvil, se buscaba probar si las piezas podían encajar milimétricamente. El resultado obtenido con estas fue realmente satisfactorio, a pesar de que en el encaje de las piezas hubo mínimas separaciones entre los originales y los vaciados. Se ha de subrayar que, durante todo el proceso, tanto en la toma de los datos como en la reintegración física de las piezas, el original fue manejado mínimamente, siendo siempre retocada y manipulada la impresión realizada, salvaguardando por tanto el original al máximo.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

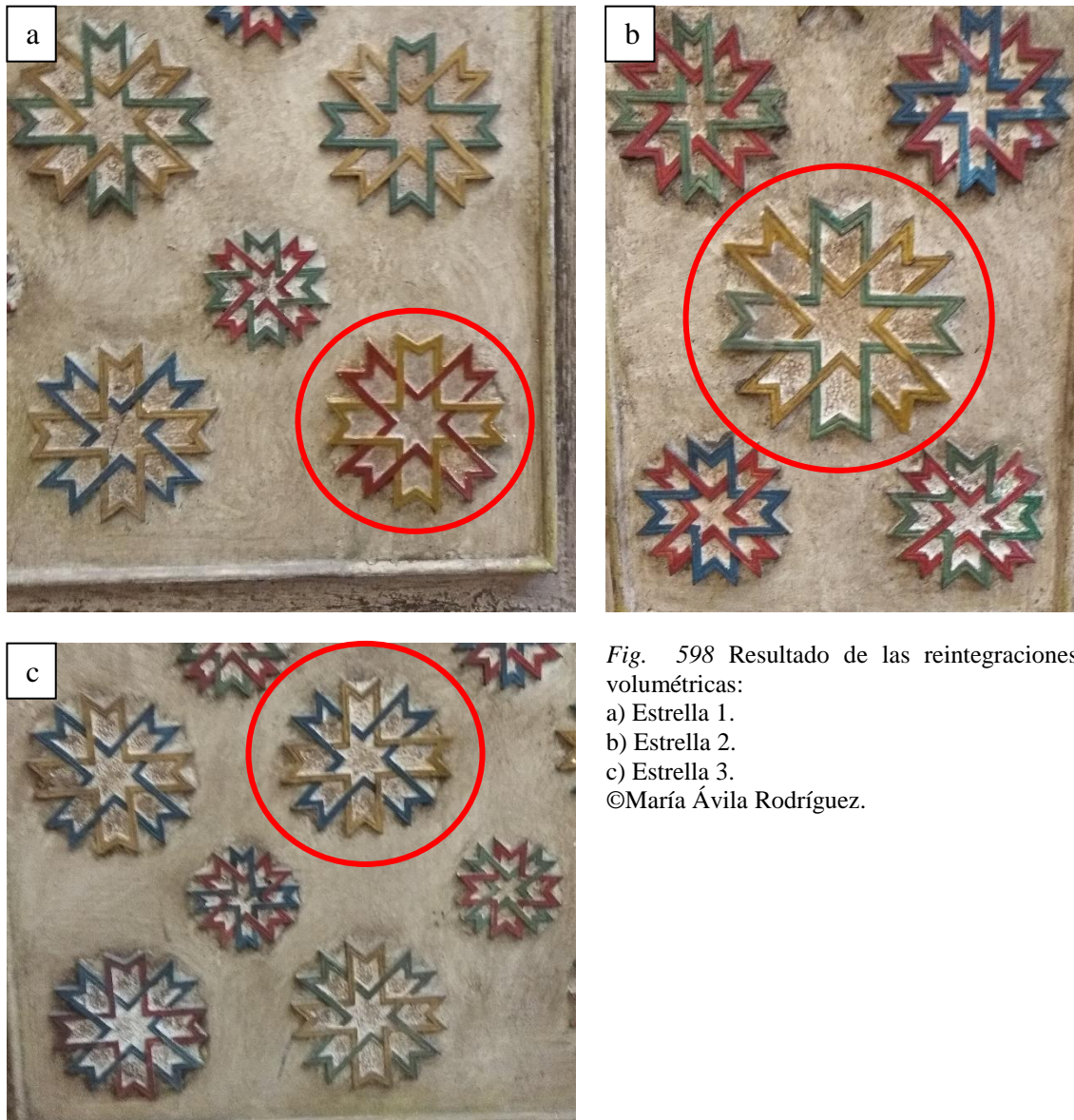


Fig. 598 Resultado de las reintegraciones volumétricas:

a) Estrella 1.

b) Estrella 2.

c) Estrella 3.

©María Ávila Rodríguez.

Capítulo 10. Conclusiones

El trabajo de investigación expuesto en esta memoria ha tenido como objetivo poner de manifiesto las diferentes implicaciones que el empleo de las tecnologías 3D tiene en el ámbito de la documentación, conservación y restauración del patrimonio, a la par que la valoración de su idoneidad y justificación del mismo. Igualmente, los casos expuestos en los que ha participado de manera directa la autora de la tesis doctoral han tenido como objeto el desarrollo de metodologías de trabajo extrapolables a otras obras con características físicas y problemáticas de conservación similar. En estos casos el empleo de las tecnologías 3D han supuesto una mejora o incluso una solución a problemáticas importantes de conservación de las obras para los que los procesos de trabajo habituales no constituían una respuesta adecuada.

Del desarrollo de esta investigación han podido extraerse ciertas conclusiones relacionadas con sus aplicaciones generales en patrimonio:

- 1- Su utilización en las tareas más vitales de salvaguarda del patrimonio cultural ha deparado excelentes resultados e inimaginables avances en las intervenciones y tratamientos aplicados, proporcionando en algunos casos técnicas e información mucho más precisas que las que ofrecían los métodos tradicionales.
- 2- Las aplicaciones que las nuevas tecnologías 3D presentan para el ámbito del patrimonio hacen conveniente legitimar estas actuaciones. Para ello, se han de conciliar las clásicas teorías de conservación ya existentes con las aportaciones más actuales que las nuevas tecnologías brindan.
- 3- Estas tecnologías amplían notablemente las posibilidades de los profesionales que ven como sus labores se desempeñan más rápidamente y, sobre todo, más eficazmente, obteniendo resultados más certeros y consiguiendo realizar intervenciones que sin las

tecnologías 3D serían totalmente inviables, bien sea por la cantidad de tiempo y/o presupuesto que requieren o por la imposibilidad de su *praxis* sin ellas.

- 4- Las tecnologías 3D aplicadas al ámbito patrimonial están propiciando un importante avance en la investigación del patrimonio a todas las escalas, desde el campo de la arqueología con algunas de sus piezas de muy reducido tamaño, pasando por las esculturas de tamaño real, hasta el patrimonio monumental y los yacimientos arqueológicos de mayores dimensiones.
- 5- Las nuevas tecnologías permiten también un importante acercamiento del patrimonio a las nuevas demandas del público en general, puesto que la sociedad actual cada día hace más uso de las nuevas tecnologías y vive inmersa en las nuevas aplicaciones y herramientas más recientes. De este modo, los avances en la tecnología digital han cambiado rápidamente y radicalmente la comprensión y apreciación del patrimonio cultural común.

Igualmente, a lo largo de la tesis se han ido desglosando las aplicaciones específicas que estas tecnologías presentan a la hora de trabajar con el patrimonio. De este estudio, puede afirmarse que:

- 1- Comienza a comprenderse la importancia que para el ámbito de la conservación y restauración de bienes culturales presenta la obtención de registros digitales en alta resolución. Estos han de ser convenientemente tratados y organizados para su buen uso en la colaboración de las tareas de salvaguarda del patrimonio, iniciándose así un nuevo modo de documentación cada vez más común en las prácticas de la conservación preventiva.
- 2- Es fundamental la importancia que el empleo de las tecnologías 3D presentan para el exhaustivo control del deterioro de piezas especialmente frágiles. Al ser digitalizadas, la documentación obtenida gracias a las nuevas tecnologías en las investigaciones aumenta la información y los datos recabados con técnicas tradicionales. La monitorización de los estados de conservación de estas obras durante fases sucesivas supone una fiel documentación de los deterioros que está experimentando.
- 3- En la realización de intervenciones y en el desarrollo de tareas de restauración de una obra, la fase de documentación es estrictamente exigida desde todos los

protocolos de actuación e incluso legalmente, por lo que recoger el máximo de información existente es en este caso, de vital importancia. Si en esta tarea se emplean las nuevas tecnologías de manera adecuada, las fases de las intervenciones quedan perfectamente documentadas, lo que permitiría, además, la posibilidad, de realizar una reproducción de la obra que mostrase su aspecto en un punto anterior al que se dejase tras su mala o desafortunada intervención.

- 4- Se valora muy positivamente la conveniencia de la digitalización sistemática de piezas completas en peligro de destrucción (por su propia naturaleza, conflictos armados o catástrofes naturales entre otras) o bien partes de ellas que sean susceptibles de robo, antes de que éstos se produzcan. Con la digitalización se evita, bien que desaparezca la obra o una parte de ella porque a partir de los datos obtenidos podría hacerse la réplica, exponer ésta mientras se guarda el original o exponer el original teniendo siempre como recurso el archivo de la pieza digitalizada; de este modo podría materializarse cuando fuera necesario debido a cualquier contratiempo que pudiese ocurrirle. Se garantiza de este modo el testimonio material de las obras o partes de ellas que se encuentran en peligro de desaparición, constituyendo el más fiel documento de su existencia.
- 5- Las comunidades de profesionales del ámbito de la conservación están comprendiendo la importancia que tiene la digitalización en alta resolución en la preservación del bien cultural, por lo que el proceso comienza a integrarse en los protocolos profesionales de actuación. Como complemento a las posturas tradicionales de restauración aparece la posibilidad de digitalizar monumentos y piezas individuales para su estudio, así como su posterior reproducción para la educación y el turismo, contribuyendo a la documentación en procesos de conservación y restauración. De este modo, es muy importante que el empleo de la digitalización como documentación previa a cualquier intervención o monitorización de estados de conservación de obras se generalice ante cualquier intervención de conservación y/o restauración del patrimonio.
- 6- Pueden extraerse importantes conclusiones de los capítulos dedicados la realización de reproducciones, puesto que la posibilidad de crearlas supone una gran contribución a las medidas de conservación preventiva de obras de arte. Éstos tienen numerosas funcionalidades, alguna de ellas especialmente importantes ya que, como ha podido comprobarse, existen casos en los cuales su realización

constituye la única alternativa y posibilidad de conservar y salvaguardar el original. Por ello, se destaca notablemente la preservación de obras originales mediante la exposición de la copia, permitiendo la conservación del original en condiciones medioambientales especialmente óptimas. Actualmente se es partícipe de un momento histórico en el que la tecnología digital aplicable a la creación de reproducciones, en combinación de los sistemas tradicionales, es de una eficacia del máximo nivel. Los avances de técnicas que ni tan siquiera rozan la pieza, han tenido un enorme impacto en el mundo de la conservación, cambiando la reputación hacia estas copias por parte de los museos y el modo de ser experimentados por el público. Como ha podido comprobarse. El facsímil se presenta, así, como una herramienta fundamental en la que debería apoyarse el mundo de la conservación preventiva, como posible solución para ciertas obras que presentan un estado de deterioro tal que obliga a los estados o a los museos a ocultarlas al público e incluso a los investigadores y se demanda que sea entendido y valorado como un trabajo objetivo y por supuesto, científico, que además de un profundo entendimiento de los originales, permite a los visitantes contribuir de forma activa a la conservación del patrimonio.

- 7- Se destaca la importancia que las tecnologías 3D tienen a la hora de conservar y restaurar las obras de arte, puesto que las restauraciones pueden realizarse de modo virtual a la espera de conseguir avances en las investigaciones o en nuevos tratamientos de conservación y restauración de la obra, o bien intervenir físicamente la obra empleando la tecnología 3D en la planificación del proceso. Como ha podido comprobarse, existe actualmente la posibilidad de emplear la tecnología 3D antes de intervenir físicamente sobre el original, con el fin de simular dicha intervención en modelos virtuales. Esto permite que antes de dañar el original, los estudios previos suministren información sobre los posibles resultados, además de poder realizarse diferentes hipótesis virtuales para poder decidir el tratamiento más idóneo que debe llevarse a cabo.
- 8- Dentro de las tareas de restauración de los bienes culturales se destaca por encima de otras prestaciones las que la tecnología 3D brinda a la hora de llevar a cabo la reintegración volumétrica de, sobre todo, esculturas. Con la digitalización del original dañado, este puede ser reintegrado imprimiendo la pieza faltante previamente creada con programas de modelado 3D, o bien reunir mediante

anastilosis virtual piezas desfragmentadas antes de pasar a intervenir físicamente la obra. En ambos casos se reduce notablemente la manipulación del bien, lo que supone siempre un gran avance en materia de conservación. En el caso de las anastilosis virtuales, se amplían las posibilidades de encajar las piezas correctamente gracias al empleo de softwares específicos, viéndose muy reducidos los tiempos de trabajo.

- 9- Sin embargo, en aquellos casos, la mayoría aún, en los que se imprime en materiales plásticos, continúa siendo necesaria la realización de los moldes y vaciados de estas piezas impresas cuando van a ser empleadas en tareas de conservación y restauración, puesto que los colores obtenidos en la impresión no suelen ajustarse a los que presenta el original. Pero, además, como ha podido comprobarse, las reintegraciones volumétricas impresas pasan a estar en contacto directo con el original; o bien en contacto indirecto si el original y el material de impresión 3D conviven, por ejemplo, dentro de una vitrina expositiva. Esto puede suponer ciertos problemas de conservación e incluso provocar daños en el material original por las diferentes propiedades de expansión y contracción que el original y la impresión puedan presentar o bien por la liberación de plastificantes u otros componentes por parte de las piezas impresas, lo que puede comprometer la estabilidad del original.

Otro riesgo a tener en cuenta surge con la incorporación de una pieza impresa en 3D a una obra o conjunto en el que estos materiales de reintegración, por encontrarse por ejemplo la obra (escultura) expuesta al aire libre. En estos casos, puede ser necesario intervenir el original repetidamente para eliminar estas piezas añadidas cuando se degraden y/o decoloren. Por ello es realmente necesario que se realicen más investigaciones sobre las propiedades y estabilidad de los materiales de impresión 3D y, más específicamente, se evalúen e identifiquen los riesgos existentes asociados al contacto directo e indirecto entre estos materiales y las piezas originales.

- 10- Por su parte, si las piezas impresas van a ser empleadas con fines didácticos o divulgativos, en numerosas ocasiones no tiene por qué realizarse el moldeo y posterior vaciado de las mismas, a partir de la pieza impresa. De este modo, la impresión podría emplearse directamente para el uso que fue concebida.

- 11- Numerosos materiales de impresión aceptan la aplicación directa de un patina, lo que permite cambiar el aspecto monocromático de la pieza. Sin embargo, es previsible que en los próximos años las impresoras 3D a color experimentarán avances y mejoras que conllevarán tanto el aumento de su uso como el consecuente abaratamiento de sus precios. De este modo, la realización de pátinas y moldes de las piezas impresas dejará de ser necesario en numerosas ocasiones.
- 12- El acercamiento entre el arte y el público en general, logrado por los museos y galerías virtuales, ha supuesto un aumento del interés, conocimiento y la sensibilidad hacia las colecciones y exposiciones por parte de sus visitantes. A pesar de las ventajas y nuevas experiencias que estas galerías y museos virtuales proponen, tales como la posibilidad de observar la obra más cerca y con más detalle que en el propio museo o ver obras que se encuentran al otro lado del mundo, la experiencia vivida en el encuentro físico con las obras de arte no es comparable, puesto que estas visualizaciones no sustituyen a los originales, si no que los complementan aumentando eso sí, su valor, cuando esas obras han desaparecido.
- 13- Por último, estas nuevas tecnologías plantean un cambio radical en la educación puesto que la posibilidad de visualizar en 3D o incluso ver y tocar modelos materializados de obras patrimoniales supone en la educación un notable aumento del entendimiento y el conocimiento por parte de los estudiantes. Similares ventajas se presentan en el ámbito de la investigación, puesto que los profesionales estudian obras en 3D o bien materializadas consiguiendo mayor comprensión en el estudio. Además, la posibilidad de trabajar con piezas y obras que se encuentran en otros países promueve la investigación tanto desde diferentes partes del mundo como desde diferentes campos y ámbitos de estudio.

Tras la revisión de las tecnologías 3D y sus aplicaciones en las tareas de documentación, conservación y restauración del patrimonio, se desarrolló el estudio de diferentes casos, en los que se aplicaron las técnicas y metodologías analizadas a lo largo de la tesis. En este punto y, como se ha indicado, las metodologías desarrolladas podrían ser extrapoladas a obras con características y problemáticas de conservación similar a aquellas obras objeto de estudio. Tras la realización de este estudio de casos, puede afirmarse que:

1- En el ámbito de la Paleobiología, las mejoras presentadas desde la implantación de la tecnología 3D son potencialmente innovadoras:

-La posibilidad de trabajar con diferentes fósiles sin tener que manipular los originales es fundamental para la conservación de los mismos, recordando los casos de manipulación directa de las impresiones tanto del cráneo de *Homo Naledi*, como del tórax y las vértebras de diferentes homínidos.

-Para el estudio de las especies se presenta realmente útil las técnicas que la morfología virtual brinda, las cuales dependen directamente de las tecnologías 3D. Así, la calidad de los estudios científicos que en ella se apoyan han obtenido resultados de investigación hasta ahora inviables. Por ejemplo, la obtención de exactas medias entre diferentes fósiles de una misma especie o bien el estudio de las distancias *Procrustes*, es hoy únicamente posible gracias a estas tecnologías, tal y como pudo verse en el caso del niño de *Nariokotome*.

-Con la técnica de retrodeformación se consigue estudiar como nunca antes había sido posible, aquellos fósiles potencialmente deformados a lo largo del tiempo. Gracias a estos estudios, se amplían los conocimientos específicos relativos a ellos, obteniéndose información imposible de conseguir sin las tecnologías 3D.

-La exposición de réplicas de fósiles creadas a partir de tecnologías 3D conlleva la posibilidad de mantener el original sin ser expuesto, en perfectas condiciones de conservación. La novedad radica principalmente en la posibilidad de obtener las reproducciones sin tener que realizar el moldeado sobre materiales extremadamente frágiles y de un gran valor científico, de modo que el original se mantiene intacto. Ejemplo de ello ha sido el facsímil realizado del cráneo de *Naledi*.

-Una vez más, debe mencionarse la posibilidad de investigar y trabajar con piezas desde cualquier parte del mundo, sin necesidad de desplazamientos, lo que reduce los costes y los tiempos de la investigación.

-La impresión de las piezas desarticuladas o bien fragmentadas permite trabajar con ellas barajando numerosas posibilidades, mientras que si se trabajase con los originales su manipulación debería siempre estar limitada para no comprometer su estabilidad, reduciéndose en numerosas ocasiones la empírica comprobación de las hipótesis. Las numerosas vertebras impresas con las que se

trabajó ilustran a la perfección este punto, puesto que numerosas fueron las pruebas y metodologías empleadas para sus uniones e hipótesis.

- 2- Por lo que a la aplicación de las tecnologías 3D al ámbito del patrimonio artístico respecta, ha podido comprobarse que:

-La realización de facsímiles empleando para ello las tecnologías 3D permite la obtención de reproducciones de una altísima calidad sin necesidad de manipular los originales. Prueba de ello fue la realización de los facsímiles del *trilobite* y la *terra sigillata*. Tal y como se ha indicado, la realización de estas reproducciones tiene numerosas implicaciones, tales como la exposición de la reproducción mientras el bien cultural original necesita un cambio de ubicación; la conservación del original en su lugar habitual de exhibición cuando se realiza un préstamo a otra institución; la conservación adecuada de las obras guardándolas y/o preservándolas en una zona climatizada; la difusión de las obras; la restitución de partes originales que se han de guardar separadas o bien se han perdido; garantizar el testimonio histórico material de las piezas, la repatriación de las obras en casos de conflictos y la reagrupación y/o reconstrucción de obras. De este modo, cada una de ellas realza el valor de su empleo para diferentes fines con el común objetivo todos ellos de contribuir en las tareas de conservación y restauración de los originales.

-Es realmente conveniente la digitalización sistemática de piezas o partes de esculturas susceptibles de robo, antes de que éstos se produzcan o bien si aparecen tras una desaparición. Gracias a esta digitalización, los datos obtenidos pueden emplearse para la realización de una réplica que sea expuesta mientras se guarda el original, o bien, en el desafortunado caso de producirse el robo, podría materializarse la información para reintegrar así la obra.

-Por su parte, a pesar de la posibilidad de tomar estas medidas para evitar los robos y malos tratos que las obras reciben, se debería en algunos casos ir más allá e implantar remedios más drásticos que aquellos que vienen generalmente siendo llevados a cabo, como por ejemplo la instalación de cámaras de seguridad en aquellas obras que sufren reiteradamente daños o la contratación de vigilancia.

-También es muy aconsejable despertar la sensibilidad hacia las obras artísticas e intentar concienciar a la población de la importancia que el patrimonio tiene en nuestra sociedad, de modo que se consiguiesen reducir las agresiones hacia el mismo.

-Conviene, además, incentivar la reflexión sobre lo que el coste, en trabajo, esfuerzo y de tipo económico, suponen este tipo de actos vandálicos contra las obras, que puede conducir a limitar la reubicación de elementos fundamentales para la comprensión de las obras únicamente a actos de carácter conmemorativo. Este hecho conlleva en numerosas ocasiones, un cambio en la composición estética original de la obra, cuyo significado se ve truncado sin esos elementos principales. Como ejemplo de estos últimos puntos citados se ha incluido el estudio de caso correspondiente a la antorcha del conjunto escultórico Los Portadores de la Antorcha, situado en la Ciudad Universitaria de la UCM.

-Con el empleo de las tecnologías 3D para reintegrar volumétricamente elementos perdidos o bien faltas presentes en las obras escultóricas y relieves, se consiguen resultados de altísima calidad en los que, sobre todo, el original se mantiene intacto. Cuando se trata de elementos seriados, las ventajas son más notables porque el diseño de las piezas faltantes parte de la digitalización del propio bien y no es, por tanto, necesario modelar la pieza partiendo de cero. Gracias al registro del original y su empleo en la reintegración de sus posibles faltas, la apariencia de la reintegración es realmente muy similar al original, por no decir idéntica. Existirán únicamente diferencias entre los materiales de reintegración y los correspondientes al original, que deben ser diferentes a fin de que la reintegración cumpla con el principio de la discernibilidad. El éxito alcanzado en la intervención llevada a cabo en las estrellas del Museo de la Facultad de Farmacia sustenta y reafirma este punto.

-Por lo que a la elección de la técnica para la digitalización respecta, ha podido comprobarse que tanto el escáner como la fotogrametría permiten obtener resultados muy satisfactorios en los proyectos que tienen por objeto la salvaguarda y difusión del patrimonio. Por su parte, los precios de los escáneres han disminuido en los últimos años y los softwares específicos de los mismos han simplificado sus interfaces, lo que supone una gran ventaja a la hora de

plantearse la compra de un equipo de este tipo. No obstante, se debe resaltar que cuando esta tesis comenzó a escribirse, en el 2014, los escáneres eran muy empleados debido a que con los softwares gratuitos de fotogrametría no se obtenían resultados tan precisos. En la actualidad no es preciso el empleo de escáneres 3D, para lograr una digitalización de calidad, lo cual supone un abaratamiento significativo en los costes de los proyectos, puesto que con una cámara fotográfica se puede conseguir una muy buena digitalización de un determinado bien.

-En cuanto a la elección de una técnica de impresión u otra, debe destacarse que esta va a depender, una vez más, del proyecto y la disponibilidad de una tecnología u otra. Dependiendo del objetivo a alcanzar será fundamental que se empleen impresoras 3D, robots o fresadoras capaces de trabajar los detalles de la superficie con un alto grado de precisión, mientras que en otros casos puede ser más importante el tiempo requerido por la tecnología para materializar la pieza, o bien el tamaño de las piezas que esta pueda imprimir. Como se ha visto, en determinados casos puede ser preferible combinar diferentes tecnologías para conformar la pieza o piezas finales y en otros es posible que simplemente sea necesario buscar una única técnica que se amolde a todas las necesidades del proyecto.

Una vez revisadas las aplicaciones que estas tecnologías aportan al campo de la conservación-restauración, así como la realización de la comprobación empírica de sus aplicaciones mediante el estudio de casos, se concluye que:

- 1- Queda constatada la importancia que presentan estas técnicas 3D en relación a la conservación y difusión del patrimonio.
- 2- No obstante, como todas las actuaciones implicadas a la hora de estudiar obras de arte, el tratamiento con tecnologías digitales aplicadas a la investigación de conservación-restauración exige una gran responsabilidad por parte de los profesionales.
- 3- Es necesario partir de las formulaciones teóricas correctas, ya que el procedimiento es empírico y la obtención de buenos resultados depende también de los conocimientos y la formación de los investigadores.

- 4- Estas tecnologías no deben nunca ser empleadas de un modo creativo por parte de los profesionales del patrimonio.
- 5- Debe, a su vez, trabajarse siempre bajo la legislación y autenticidad vigentes y conocidas.
- 6- Es y será siempre esencial la realización de una exhaustiva investigación de la obra, que incluya el estudio interdisciplinar para que los proyectos continúen siendo científicos.
- 7- De este modo, se recalca, una vez más, que cada proyecto precisa de especialistas capaces de interpretar los datos obtenidos, apoyándose en su experiencia y conocimientos de legislación, criterios de intervención, y protocolos de actuación, de modo que estos profesionales permitan realizar correctamente cada una de estas intervenciones.
- 8- Puede también indicarse que el íntimo conocimiento de las definiciones, leyes y los derechos de autor referentes a las nuevas tecnologías conlleva el máximo respeto a los bienes culturales originales. Sin embargo, dada la acogida que los profesionales del patrimonio están dando a estas prácticas que emplean las tecnologías 3D en los procesos de conservación-restauración, es urgente la creación protocolos y normas de actuación específicos con el fin de regularizar y normalizar sus aplicaciones en patrimonio, puesto que la existencia aun de ciertos vacíos legales pueden conllevar una bienintencionada mala *praxis*.
- 9- Por último, el estudio de los casos propuestos puede servir para extrapolar la metodología desarrollada a partir de ellos a otras obras de características semejantes o bien para aquellas obras que presenten una problemática de conservación-restauración similar. Se deja además el campo abierto para aplicar esta metodología en aquellas obras en las cuales se piensa pueda constituir de ayuda para su conservación o difusión. Por ejemplo, podría servir para reintegrar objetos o bienes culturales realizados en polímeros sintéticos o incluso piezas realizadas en madera o constituidas por otros materiales orgánicos o inorgánicos de origen natural (tales como huesos, insectos, cuernos, huevos, etc.).

GLOSARIO DE ACRÓNIMOS Y ABREVIACIONES

ABS: Acrylonitrile Butadiene Styrene.

API: Application Programming Interface.

ASPRS: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

BBAA: Bellas Artes.

BIC: Bien de Interés Cultural.

CAA: Computer Applications & Quantitative Methods in Archaeology.

CAVE: Cave Assisted Virtual Environment.

CGAC: Centro Gallego de Arte Contemporáneo.

CIFA: Chartered Institute for Archaeologists.

CNSE: Confederación Estatal de Personas Sordas.

CSIC: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

DA: Diseño Asistido.

DMLS: Direct Metal Láser Sintering.

DXF: Drawing Exchange Format.

ESME: Extensible Solid Model Editor.

FA: Fabricación Asistida.

FC: Fabricación por capas.

FFF: Fused Filament Fabrication.

GUI: Graphical User Interface.

HDS: High Definition Surveying.

I3D: Impresora 3D.

IAPH: Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico.

ICOM: International Council of Museums.

ICOMOS: International Council on Monuments and Sites.

INNOVA: Virtual Archaeology International Network.

IPCE: Instituto del Patrimonio Cultural de España.

ISPRS: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

LIDAR: Laser Imaging Detection and Ranging.

LPHE: Ley del Patrimonio Histórico Español.

LPI: Ley de Propiedad Intelectual.

MAN: Museo Arqueológico Nacional.

MARQ: Museo Arqueológico Provincial de Alicante.

MDF: Modelado por Deposición Fundida.

MECD: Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.

MOMA: Museum of Modern Art.

MMC: Máquinas de medición por coordenadas.

MNCN: Museo Nacional de Ciencias Naturales.

MPD: Manufactura de Partículas Disparadas.

MUPAI: Museo Pedagógico de Arte Infantil.

OCPM: Organization of World Heritage Cites.

ONCE: Organización Nacional de Ciegos Españoles.

PDA: Personal Digital Assistant.

PDF: Portable Document Format.

PLA: Poly Lactic Acid.

RA: Realidad Aumentada.

RV: Realidad Virtual.

RAE: Real Academia Española.

RM: Rapid Manufacturing.

RP: Rapid Prototyping.

RT: Rapid Tooling.

RTV: Room Temperature Vulcanizing.

RTVE: Radio Televisión Española.

SCA: Supreme Council of Antiquities.

SNI: Sistema de Navegación Inercial.

SEAV: Sociedad Española de Arqueología Virtual.

SFM: Structure From Motion.

SIG: Sistema de información geográfica.

SLA: Stereolithography.

SLS: Selective Laser Sintering.

SPG: Sistema de Posicionamiento Global.

TI: Tecnología de la Información.

TIC: Tecnologías de la Información y Comunicación.

UCM: Universidad Complutense de Madrid.

UNED: Universidad Nacional de Educación a Distancia.

UNESCO: United Nations Educational, Scientifics and Cultural Organitation.

VA: Virtual Arqueology.

VEGAP: Visual Entidad de Gestión de Artistas Plásticos.

VRML: Virtual Reality Modeling Language.

VTa: Vulcanización a Temperatura Ambiente.

GLOSARIO DE TERMINOLOGÍA

Alcohol polivinílico: compuesto por una proporción variable de resina vinílica diluida en alcohol. Es hidrosoluble, presenta fuerte viscosidad por lo que también es empleado como adhesivo de materiales porosos. Es una sustancia reversible, ya que una vez seco se puede volver a diluir con etanol. Sin embargo, si penetra en exceso en el objeto su retirada puede resultar algo más compleja. Se retira bien, en seco, de las superficies de vidrio.

Arqueología virtual: tiene por objeto la investigación y el desarrollo de formas de aplicación de la visualización asistida por ordenador a la gestión integral del patrimonio arqueológico.

Auténtico: verdadero, bueno y legal, siendo una cualidad referida al carácter propio de la obra artística

Bastidor: ensamblaje de carpintería en este caso en forma de jaula de madera.

Barbotina: arcilla en fase muy líquida.

Barro: mezcla de sílice y alúmina que empapada en agua es flexible.

Bentonita: derivado orgánico obtenido mediante el tratamiento de una tierra natural (montmorillonita). Su nombre comercial es Bentone. Presenta un tamaño de partícula muy reducido (menos de 1 μm) y un tono blanco cremoso. Debe tenerse en cuenta que modifica el color de la resina.

Bien de interés cultural: figura jurídica de protección del patrimonio histórico español, tanto mueble como inmueble.

Bramantes: hilo gordo o cordel muy delgado hecho de cáñamo.

Ceras: suelen emplearse también en la protección de vidrio y cerámica vidriada. Si se aplican sobre una pieza porosa, previamente debería haberse aplicado un protector, ya que son absorbidas y producen alteraciones de color y cambios en la tensión superficial de la escultura. Tradicionalmente se han empleado también como desmoldeantes, cuando se realiza un positivo en escayola a partir de un molde realizado con el mismo material.

Coloides protectores: geles elaborados mediante derivados celulósicos. Suelen emplearse en objetos porosos y con cierta textura como la cerámica vidriada.

Composite: o *resinas compuestas* son materiales sintéticos que están mezclados heterogéneamente de elementos variados y que forman un compuesto, que le da unas propiedades mecánicas notablemente superiores a las de las materias primas de las que procede. Tales moléculas suelen formar estructuras muy resistentes y livianas.

Computadora: máquina electrónica dotada de una memoria de gran capacidad y de métodos de tratamiento de la información, capaz de resolver problemas matemáticos y lógicos mediante la utilización automática de programas informáticos.

Conservación: todas aquellas medidas o acciones que tengan como objetivo la salvaguardia del patrimonio cultural tangible, asegurando su accesibilidad a generaciones presentes y futuras. La conservación comprende la Conservación Preventiva; la conservación curativa y la restauración.

Consolidante: tiene la función de consolidar, endurecer.

Copia: imitación de un objeto e incluso una reproducción del original muy aproximada, suele no ser al original.

Datos en bruto raw: aquellos que no han sido procesados.

Desmoldeante: sustancia antiadhesiva aplicada en la zona del molde.

Digitalizar: expresar datos en forma digital.

Disolvente: medio solvente de una disolución. Aumentan la fluidez, aunque pueden alterar las propiedades de la resina.

Eflorescencia: depósitos de sales cristalizadas que se posan en forma de mancha, generalmente, blanquecinas.

Elastómero: corresponden a los polímeros amorfos. Son elásticos. Pueden ser de origen natural y de origen sintético. Entre los elastómeros sintéticos se destaca la silicona y el poliuretano.

Escáner: dispositivo que explora un espacio o imagen, y los traduce en señales eléctricas para su procesamiento.

Escultura: arte de modelar, tallar o esculpir en barro, piedra, madera, etc.

Escultura de bulto redondo: aquella que permite contemplar cualquier punto de vista a su alrededor.

Estatuaria: arte de hacer estatuas.

Estireno: disminuye la viscosidad de la resina poliéster. Suele aparecer en la composición de las resinas.

Estuco mármol: proceso artesano de imitación a mármol. Para su realización pueden emplearse el yeso o cal.

Facsimil: perfecta imitación o reproducción de una firma, de un escrito, de un dibujo, de un impreso, etc.

Falso histórico: resultado de cualquier intervención tendente a la restitución del aspecto original de la obra. Si ante una intervención se pretende substituir al propio artista o suplantarlo, se está cometiendo un claro falso histórico. Este se refiere no tanto a la originalidad de la materia sino a los valores esenciales de la obra.

Fotocurable: cuya polimerización se realiza por medio de la lámpara de luz halógena.

Fotogrametría: arte, ciencia y tecnología de obtener información fidedigna de los objetos físicos y del medio ambiente mediante procesos de registro, medición e interpretación de imágenes fotográficas y

de modelos de energía radiante electromagnética y otros fenómenos.

Fotosensible: aquel que contiene una capa o un conjunto de capas sensible a la luz que reaccionan al contacto con la luz formando una imagen latente.

Fraguar: dicho de la cal, del yeso o de otras masas: Trabajar y endurecerse consistentemente en la obra fabricada con ellos.

Fundición: procedimiento para obtener esculturas en bronce.

Gel de Sílice: forma granular y porosa de dióxido de silicio, fabricado sintéticamente a partir de silicato sódico. A pesar del nombre, el gel de sílice es un sólido. No aporta color a la resina (únicamente la enturbia). Presenta un tamaño de partícula de entre 10-40µm.

Gesso: en su versión comercial es una base de carbonato cálcico (CaCO_3) pulverizado, acetato de polivinilo y resinas acrílicas.

Gipsoteca: conjuntos de obras antiguas reproducidas siguiendo el sistema del vaciado.

Goma laca: sustancia orgánica que se obtiene a partir del residuo o secreción resinosa de un pequeño insecto rojo llamado *gusano de la laca*.

Háptica: sistema de percepción, integración y asimilación de sensaciones, a través del tacto activo. Constituye la base del desarrollo y aprendizaje de los alumnos con discapacidad visual, especialmente de los que presentan ceguera total.

Infografía: técnica de elaboración de imágenes mediante computadora.

In Situ: expresión latina que significa “en el sitio” y que suele utilizarse para designar un fenómeno observado en el lugar o una manipulación realizada en el lugar.

Interfaz: medio con que el usuario puede comunicarse con un ordenador.

Láser: dispositivo electrónico que, basado en la emisión inducida, amplifica de manera extraordinaria un haz de luz monocromático y coherente.

Levantamiento: proceso que debe llevar al conocimiento profundo de la obra en estudio, con el fin de poner en evidencia todos sus valores, tanto geométricos

como dimensionales, figurativos como estructurales, desde los materiales empleados y las técnicas constructivas, hasta las condiciones de degradación y las relaciones con el contexto urbano.

Mapa de daños: imagen en la que se muestran las diferentes alteraciones y daños generados en una obra.

Microprocesador: circuito constituido por millares de transistores integrados en un chip, que realiza alguna determinada función de los computadores electrónicos digitales.

Molde: la pieza o grupo de piezas en las que se realizan en hueco, es decir, en negativo volumétrico, las formas que luego adquirirá el material de reproducción. Ese material ha de ser fluido, fundido, blando o maleable, para adaptarse a los accidentes del molde

Museología: ciencia que trata los museos.

Original: juicio de valor, que a modo cuantitativo mide el grado de creatividad de las obras.

Originalidad: juicio de valor, que a modo cuantitativo mide el grado de creatividad de las obras. Por auténtico se

entiende algo que viene a ser verdadero, bueno y legal, siendo una cualidad referida al carácter propio de la obra artística.

Ortofoto: es una fotografía de vista aérea que puede ser utilizada para realizar mediciones reales ya que es una representación precisa, en la que se han corregido las distorsiones inherentes a las imágenes aéreas.

Pantógrafo: aparato para reproducir a escala un original.

Paraloid B-72: copolímero de metacrilato de etilo y acrilato de metilo. Soluble en xileno, acetona, tolueno, white spirit y alcohol isopropílico. Ligeramente soluble en etanol. Se elimina con facilidad pero cambia el tono en los objetos porosos y puede dejar algunos restos. Resulta recomendable su empleo con objetos metálicos.

Paraloid B-82: más denso que el anterior y puede diluirse, en acetona y en tolueno, recomendándose su empleo también para metales.

Patrimonio histórico-artístico: conjunto de edificios, yacimientos arqueológicos, obras de arte, objetos y documentos de

interés científico, histórico o artístico de un país.

Perfilómetro: equipo utilizado para evaluar superficies que produce un registro continuo de la pendiente longitudinal del pavimento entre dos puntos dados, y obtiene el desnivel de la superficie del pavimento con respecto a una referencia horizontal.

Plomada: instrumento compuesto por una pesa cilíndrica o cónica de metal que se sujeta al extremo de una cuerda para que esta, tensada por la fuerza de la gravedad, señale la línea vertical.

Plástico: polímero al que habitualmente se añaden aditivos a fin de modificar el material, de modo se mejore su proceso de fabricación y su utilización. Se obtienen a partir del petróleo, gas natural, carbón y otras materias y se componen fundamentalmente de carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre.

Polímero: molécula de gran tamaño formada mediante la unión de otras moléculas más pequeñas: los monómeros.

Políptico: pintura dividida en múltiples secciones o paneles.

Prototipo: modelos tridimensionales reales, ejemplar original o primer molde en que se fabrica una figura u otra cosa.

Reconstrucción virtual: intento de recuperación visual, a partir de un modelo virtual, de un momento determinado de una construcción u objeto fabricado por el ser humano en el pasado a partir de las evidencias físicas existentes sobre dicha construcción u objeto, las inferencias comparativas científicamente razonables y en general todos los estudios llevados a cabo por los arqueólogos y demás expertos vinculados con el patrimonio arqueológico y la ciencia histórica.

Recreación virtual: comprende el intento de recuperación visual, a partir de un modelo virtual, del pasado en un momento determinado de un sitio arqueológico, incluyendo cultura material (patrimonio mueble e inmueble), entorno, paisaje, usos, y en general significación cultural.

Reintegración cromática: restitución de las posibles faltas o laguna de la capa pictórica o de la policromía de una obra escultórica.

Reintegración volumétrica: intervención que tiene como objetivo recomponer la materia perdida, es decir, las faltas o pérdidas tridimensionales, en una obra de arte.

Reflectancia: capacidad de un cuerpo de reflejar la luz

Reflectividad: fracción de radiación incidente reflejada por una superficie.

Registro: detalle.

Renderizar: calcular la representación de una escena teniendo en cuenta la iluminación y el ambiente, así como los objetos que en ella aparecen.

Réplica: copia exacta de algo, especialmente de una obra artística.

Reproducción: busca que sea idéntica al original.

Resinas: materiales plásticos que se adhieren por microretención, debe biselarse el borde cabo superficial de la cavidad, la cual a su vez debe ser conservadora. Al biselarse se exponen los prismas adamantinos en forma transversal, favoreciendo la desmineralización o descalcificación en forma rápida.

Restauración: acciones aplicadas de manera directa a un bien que tengan como objetivo facilitar su apreciación, compresión y uso

Resolución: claridad o finura en el detalle que se puede distinguir en una imagen producida por un dispositivo de imagen, como un monitor, impresora o escáner.

Rhoid: material plástico derivado del acetato de celulosa.

Salvaguardar: defender, amparar, proteger.

Software: aplicación informática de un sistema, que comprende el conjunto de los componentes lógicos necesarios que hacen posible la realización de tareas específicas.

Silicona: Sustancia química de consistencia cremosa o sólida, compuesta principalmente de silicio y oxígeno, que presenta una gran resistencia al calor, a la humedad y a la electricidad.

Specklenoise: efecto artificial producido por la proyección del rayo de luz sobre ciertas superficies.

Synocril: metacrilato de metilo en solución de tricloroetileno. Puede emplearse disuelto en acetona y en concentraciones bajas.

Tallar: esculpir, labrar un material duro con un instrumento cortante.

Tensión superficial: cantidad de energía necesaria para aumentar su superficie por unidad de área, determinada por las fuerzas cohesivas que presenten las moléculas que componen el líquido.

Textura tileada: fotografía empleada para texturizar que ha sido modificada previamente para que, si se repite en el objeto 3D, no se diferencie dónde empieza y dónde acaba por que sus límites izquierdo y derecho/superior e inferior coinciden.

Texturizado: fase en la que se le aplica la textura a la malla del objeto, es decir, la información referente al color.

Tixotropía: capacidad de un líquido para reducir su viscosidad aparente mientras se aplica una cierta cantidad de calor o energía mecánica, como el corte o la vibración.

Trigonometría: que miden por triangulación.

Vaselina: mezcla homogénea de hidrocarburos saturados de cadena larga, generalmente cadenas de más de 25 átomos de carbono, que se obtienen a partir del refinado de una fracción pesada del petróleo.

Visores web: aplicaciones online que permiten subir el modelo 3D a internet

por lo que las capacidades de estas herramientas son muy amplias.

Yeso: piedra de yeso natural (algez, cuya composición es $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y la misma materia tratada industrialmente por el hombre para sus diferentes usos.

REFERENCIAS

REFERENCIAS

Referencias Introducción

Icom. (2008). *Terminología para definir la conservación del patrimonio cultural tangible*. Traducción al español de la resolución adoptada por los miembros de ICOMCC durante la 15ª Conferencia Trienal, New Delhi, 22-26 de septiembre de 2008. Recuperado de http://www.icom-cc.org/54/document/icom-cc-resolucion-terminologia-espanol/?action=Site_Downloads_Downloadfile&id=748

Referencias capítulo 1

Libros, artículos de revistas y conferencias

Buill, F., Núñez, M. A., y Rodríguez, J. J. (2003). *Fotogrametría analítica*. Barcelona, España: Ediciones de la universidad Politécnica de Cataluña.

Espinel, J. C. (2016). *Procesos digitales y sistemas de prototipado rápido aditivos aplicados a la creación escultórica de pequeño formato y relieves* (Tesis Doctoral). Universidad Complutense de Madrid, Madrid.

Ferrer, R. y Ruiz Bedia, M. L. (2006). Fotogrametría Aplicada a Patrimonio. En Universidad de Cantabria, Servicio de Publicaciones: Ayuntamiento de Reinosa (Ed.), *Actas de los XVI Cursos Monográficos sobre el Patrimonio Histórico (Reinosa julio 2005)* (pp. 109-120). Reinosa (Santander), España.

Gañán, C. (1999). *Técnicas y evolución de la imagerie policroma en Sevilla*. Sevilla, España: Universidad de Sevilla.

Gil, R. (2015). *Protocolos de Conservación y Restauración aplicables a la Colección de Aves y Mamíferos Naturalizados del Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid* (Tesis Doctoral). Universidad Complutense de Madrid, Madrid.

Horie, C.V. (1987). *Materials for conservation. Organic consolidants, adhesives and coatings* [Materiales de conservación. Consolidantes orgánicos, adhesivos y recubrimientos]. London: Butterworths.

Kuspit, D. (2006). Del Arte analógico al arte digital. De la representación de los objetos a la codificación de las sensaciones. *Arte digital y videoarte: transgrediendo los límites de la representación* (Caro, M.), (pp. 10-46). Madrid: España.

Luzón, J. M. (2003). Sobre la copia de antigüedades romanas y el caso del Westmorland. En Universidad de Cantabria. En Universidad de Cantabria (Ed.), *Actas de los XIII Cursos Monográficos sobre el Patrimonio Histórico (Reinosa julio-agosto 2002)* (pp. 17-30). Reinosa (Santander), España.

Marcos, A. (2003). Copias y reproducciones de piezas arqueológicas: Resumen. En Universidad de Cantabria (Ed.), *Actas de los XIII Cursos Monográficos sobre el Patrimonio Histórico (Reinosa julio-agosto 2002)* (pp. 31-40). Reinosa (Santander), España.

Marras, A. y Rojo, E. (2011). Procedimientos fotogramétricos para inspecciones de parámetros de presas. Aplicación a la presa de San Esteban. Campañas 2001 y 2006. En García R. et al. (Eds.), *Dan maintenance and Rehabilitation II*. Londres, Inglaterra: Taylor and Francis Group.

- Matía, M. (2009). Reproducibilidad. En Tres Cantos (Ed.), *Procedimientos y materiales en la obra escultórica* (pp. 99-132). Madrid. España: Akal.
- Navarro Lizandra, J. L. (2002). *Maquetas, modelos y moldes: materiales y técnicas para dar forma a las ideas*. Castelló de la Plana, España: Universitat Jaume I.
- Pereira, C. (1999a). Facsímiles de objetos de arte tridimensional 1º Parte: Moldeo. *Restauración & Rehabilitación*, 25, 66-71.
- Rubio, R. (2006). El material de yeso: comportamiento y conservación. *Cuadernos de restauración*, 6, 57-68.
- Rubio, R. (2010). *Yaserías de la Alhambra. Historia, técnica y conservación*. Granada, España: Universidad de Granada.
- Rudel, J. (1986). *Técnica de la escultura*. México, México: Fondo de cultura económica de México.
- Santos, S. (2005), *Las preparaciones de yeso en la pintura sobre tabla de la escuela española* (Tesis Doctoral). Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
- Santos, S. (2015). *El yeso: su elaboración y empleo en la pintura y dorado de retablos*. El Ejido (Almería), España: Círculo Rojo.
- Santos, S. (2017a). El empleo de las tecnologías 3D en la conservación del patrimonio y su aplicación en la realización de reproducciones de bienes culturales. *Observar*, 1, (11), 97-114.
- Santos, S. (2017b). La realización de reproducciones artísticas como medida de conservación preventiva en los museos. *Revista de Museología*, 68, 112-126.
- Sauras, J. (2003). *La escultura y el oficio de escultor*. Barcelona, España: Ediciones del Serbal.

Libros, revistas y congresos online

Almagro, A. (2004). *Levantamiento Arquitectónico, Universidad de Granada*. Recuperado de digital.csic.es/bitstream/10261/19802/1/Levantamiento.pdf

Aparicio, P., Carmhona, J. D., Fernández Díaz, M. y Marín, P. M. (2014). Fotogrametría Involuntaria: rescatando información geométrica en 3D de fotografías de archivo. *Virtual Archaeology Review*, 5(10), 11-20. Recuperado de https://www.academia.edu/7847107/_Fotogrametr%C3%ADa_Involuntaria_Rescatando_informaci%C3%B3n_geom%C3%A9trica_en_3D_de_fotograf%C3%ADas_de_archivo

Arcusa, H, Rojo, M., Royo, J. I., Tejedor, C., García Martínez, I. y Garrido, R. (2016). La fotogrametría como alternativa al registro de materiales arqueológicos: su aplicación en la cueva de Els Trocs y Valmayor XI. En Lorenzo, J. I. y Rodanés, J. M. (Eds.), *I Congreso de Arqueología y Patrimonio Aragonés (CAPA)* (pp. 533-539). Sesión 4. Arqueometría y nuevas tecnologías. Colegio Oficial de Doctores y Licenciados en Filosofía y Letras y en Ciencias de Aragón. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/304581921_LA_FOTOGRAMETRIA_COMO_ALTERNATIVA_AL_REGISTRO_DE_MATERIALES_ARQUEOLOGICOS_SU_APLICACION_EN_LA_CUEVA_DE_ELS_TROCS_Y_VALMAYOR_XI

Ávila, M. (2017). Aplicación de la tecnología 3d a la restauración, conservación y documentación del patrimonio cultural. En Universitat Politècnica de Valencia (Ed.), *Actas de Jornadas de Investigación Emergente en Conservación y Restauración del Patrimonio, Emerge 2016*, (pp. 192-199). Valencia, España. Recuperado de http://emerge.blogs.upv.es/files/2017/04/LIBRO-ACTAS-EMERGE-2016_07_04_17.pdf

Biosca, J. M., Navarro Tarín, S. y Lerma, J. L. (2007). *Modelado tridimensional de una bóveda barroca mediante la combinación de láser escáner y fotogrametría*. Recuperado de <http://jllerma.webs.upv.es/pap021.pdf>

Cabrelles, M., Lerma, J. L., Navarro Tarín, S. y Seguí, A. E. (2013). Modelado fotorrealístico 3D a partir de procesos fotogramétricos: láser escáner versus imagen digital. *Cuadernos de Arte Rupestre*, 6, 85-90. Recuperado de http://www.cuadernosdearterupestre.es/arterupestre/6/LermaCAR2012_06_08.pdf

Cámara, L. y Latorre, P. (2003). El Modelo Analítico Tridimensional obtenido por fotogrametría. Descomposición, manipulación y aplicaciones en el campo de la restauración arquitectónica. *Arqueología de la Arquitectura*, 2, 87-96. Recuperado de <http://arqarqt.revistas.csic.es/index.php/arqarqt/article/view/29/29>

Campana, S. (2014). 3D modeling in archaeology and cultural heritage- Theory and best practice [Modelado 3D en arqueología y patrimonio cultural - Teoría y mejores prácticas]. In Redondino, F. & Campana, S. (Eds.), *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage. Theory and best practices* (pp. 7-12). British Archaeological Reports. Recuperado de https://www.academia.edu/5719952/3D_Modeling_in_Archaeology_and_Cultural_Heritage_Theory_and_Best_Practices?auto=download

García-Gómez, I., Fernández de Gorostiza, M. y Mesanza, A. (2011). Láser escáner y nubes de puntos. Un horizonte aplicado al análisis arqueológico de edificio. *Arqueología de la arquitectura*, 8, 25-44. doi 10.3989/arqarqt.2011.10019

García Molina, D. F., y de Paula, F. (2012). El Láser-Escáner 3D aplicado al patrimonio arquitectónico de Priego de Córdoba: La Torre del Homenaje. *Antiquitates*, 24. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4099807.pdf>

De la Torre-Cantero, J., Saorín, J. L., Meier, C., Melián-Díaz, D. y Drago-Díaz, M. (2015). Creación de réplicas de patrimonio escultórico mediante reconstrucción 3D e impresoras 3D de bajo coste para uso en entornos educativos. *Arte, Individuo y Sociedad*, 2015, 27 (3), 429-446. Recuperado de <http://revistas.ucm.es/index.php/ARIS/article/view/45864/46408>

Escriva, F. y Madrid, J. A. (2011). El mundo virtual en la restauración. Aplicaciones virtuales para la conservación y restauración del patrimonio. *Arché, Publicación del*

instituto universitario de restauración del patrimonio de la UPV, 4 y 5, 11-20. Recuperado de http://www.irp.webs.upv.es/documents/arche_article_122.pdf

Esquivel, J. A., Benavides, J. A., y González, C. (2012). Utilización de un modelo digital mediante laser escáner 3D para la documentación y restauración del castillo de Piñar (Granada, Andalucía). *I congreso internacional El patrimonio cultural y natural como motor de desarrollo: Investigación e innovación* (pp. 2171-2179). Recuperado de <http://dspace.unia.es/handle/10334/3456>

Fort, R., Álvarez, M., Vázquez-Calvo, C. y Gómez-Villalba, L. (2013). Perfilómetro. Análisis de la microrugosidad mediante técnicas portátiles: aplicaciones y casos de estudio en patrimonio. *La Ciencia y el Arte IV. Ciencias experimentales y conservación del patrimonio* (pp. 198-216). Recuperado de http://digital.csic.es/bitstream/10261/115409/1/CA_2012_4_198.pdf.

García San Miguel, D., Lerma, J. L. y Navarro Tarín, S. (2013). Calibración geométrica de escáner terrestre mediante software específico. *Revista Mapping*, 22(158), 30-39. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10251/57776>

Incropera, F. y de Witt, D. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor* (Cruz, R.). Recuperado de <https://books.google.es/books?id=QqfJw4tpIjcC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

Hung-Ming, C., Ya-Ning, Y., Min-Bin, C. & Wun-Bin Y. (2010). A Processing for Digitizing Historical Architecture [Un procesamiento para digitalizar la arquitectura histórica]. *Digital Heritage*, 6436, 1-12. Recuperado de <http://www.cut.ac.cy/euromed2016proceedings/pdf/2010/fullPapers2010.pdf>

Jerez, J. (2010). Tixotropía en fluidos poliméricos utilizados en la perforación de pilotes y pantallas. *Ingeopres: Actualidad técnica de ingeniería civil, minería, geología y medio ambiente*, 189, 18-20. Recuperado de http://www.geosoil.com/espanol/publicaciones/1002_tixotropia_polimeros.pdf

Jover, I. y Tejerina, D. (2011). Sobre el hallazgo de un nuevo testimonio epigráfico en Gorga (El Comtat) y su registro mediante la utilización de escáner láser 3D. *Alberri 21, Quaderns d'investigació del Centre d'Estudis Contestans*. Recuperado de https://www.academia.edu/2006124/Sobre_el_hallazgo_de_un_nuevo_testimonio_epigr%C3%A1fico_en_Gorga_El_Comtat_y_su_registro_mediante_la_utilizaci%C3%B3n_de_esc%C3%A1ner_l%C3%A1ser_3d

Koroso, I. (2013). Registro y gestión de la información geométrica y temática en la restauración de la Catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz. En Junta de Castilla y León y Consejería de Cultura y Turismo (Eds.). *Actas VIII Congreso Internacional AR&PA 2012* (pp.192-202). Recuperado de <http://www.jcyl.es/web/jcyl/binarios/613/71/actasAR&PA2012.pdf>

Loscos, C., Tecchia, F., Frisoli, A., Carrozzino, M., Ritter, H., Swapp, D. & Bergamascon M. (2004). The Museum of Pure Form: touching real statues in an immersive virtual museum [El Museo de la Forma Pura: tocar estatuas reales en un museo virtual inmersivo]. *The 5th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST*. doi: <http://dx.doi.org/10.2312/VAST/VAST04/271-279>

Mañana-Borrazás, P., Rodríguez Paz, A. y Blanco-Rotea, R. (2008). Una experiencia en la aplicación del Láser Escáner 3D a los procesos de documentación y análisis del Patrimonio Construido: su aplicación a Santa Eulalia de Bóveda (Lugo) y San Fiz de Solovio (Santiago de Compostela). *Arqueología de la arquitectura*, 5, 15-32. Recuperado de <http://digital.csic.es/bitstream/10261/15849/3/84.pdf>

Marichalar, J. y Tejada, S. (2007). Prólogos institucionales. *Velázquez. Esculturas para el Alcázar* (pp. 11-20). Recuperado de http://www.realacademiabellasartessanfernando.com/assets/docs/velazquez_esculturas_alcazar/Preliminares.pdf?PHPSESSID=eb803f2f4a83b1685cffd7e8632b14eb

Martín, P., Llamas, J. M., y Perán, J. R. (2013). Recuperación Virtual de Policromías Mediante Modelos 3D. En Junta de Castilla y León y Consejería de Cultura y Turismo (Eds.). *Actas VIII Congreso Internacional AR&PA 2012* (pp.79-88). Recuperado de <http://www.jcyl.es/web/jcyl/binarios/613/71/actasAR&PA2012.pdf>

Micheletti, N., Chandler, J. H. & Lane S. N. (2015). Structure from Motion (SfM) Photogrammetry [Structure from Motion (SfM)]. In Clarke, L. E. & Nield, J. M. (Eds.). *Geomorphological Techniques 1379*. London, UK: British Society for Geomorphology. Recuperado de https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/bitstream/2134/17493/3/2.2.2_sfm.pdf

Natividad, P. y Calvo, J. (2010). Levantamiento arquitectónico mediante fotogrametría multimagén aplicada a las Torres de Cuarte. *III Jornada de Introducción a la Investigación de la UPCT*, 3, 9-11. Recuperado de <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/2022/lam.pdf;jsessionid=D37126D3C2762D2A556581A45AF557F1?sequence=1>

Rodríguez Silgo, A. (2015). Digitalización y virtualización del patrimonio cultural. Hacia un nuevo horizonte en la conservación-restauración. En Fundación Telefónica (Ed.), *Telos*, Cuadernos de Comunicación e Innovación, 102, 1-8. Recuperado de <https://telos.fundaciontelefonica.com/url-direct/pdf-generator?tipoContenido=articuloTelos&idContenido=2015110316500003&idioma=es>

Ruiz, J. A, Garcés, S., Gambús, M., Mas, C., Perales, F. J. y Ponseti, X. (2012). La capacidad prospectiva y de visualización del escáner láser 3D aplicado al plan de conservación preventiva del conjunto cerámico, piedra y hierro de Antoni Gaudí y Josep María Jujol en la catedral gótica de Mallorca. *Virtual Archaeology Review*, 3(5). Recuperado de <http://polipapers.upv.es/index.php/var/article/view/4528/4664>

Stanco, F., Tanasi, D., Allegra, D., Milotta, F., Lamagna, G. & Monterosso, G. (2017). Virtual anastylosis of Greek sculpture as museum policy for public outreach and cognitive accessibility [Anastylosis virtual de la escultura griega como política del museo para el alcance público y el acceso cognitivo]. *Journal of Electronic Imaging*, 26(1), 011025-1 - 011025-12. doi: 10.1117/1.JEI.26.1.011025

Tejado, J. M. (2005). Escaneado en 3D y prototipado de piezas arqueológicas: las nuevas tecnologías en el registro, conservación y difusión del patrimonio arqueológico. *Iberia*, 8, 135-158. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2526197.pdf>

Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J. & Reynolds J. M. (2012). Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications in Geomorphology [Fotogrametría de Structure-from-Motion: una herramienta efectiva y de bajo costo para aplicaciones geocientíficas en Geomorfología]. *El Sevier*, 179, 300-314. Recuperado de http://www.geomorphology.org.uk/sites/default/files/geom_tech_chapters/2.2.2_sfm.pdf

Recursos electrónicos

Agisoft. (2016). *Agisoft PhotoScan User Manual: Standard Edition, Version 1.2*. [Manual de usuario de Agisoft PhotoScan: Edición estándar, Versión 1.2.]. Recuperado de http://www.agisoft.com/pdf/photoscan_1_2_en.pdf

Agisoft. (Sin fecha). *Autodesk*. Recuperado de <http://www.agisoft.com/>

Arc Gis. (Sin fecha). *Arc GIS for Desktop* [Arc Gis para el escritorio]. Recuperado de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>

Autodesk 123D Catch. (2016). *Autodesk*. Recuperado de <http://www.123dapp.com/catch>

Autodessys, Inc. (2004). *Complemento de form-Z Microscribe*. Recuperado de ftp://ftp.formz.com/pub/formz/PDF_files/Documentation/Espanol/formZ_v4.0_Documentation/Microscribe%20Plugin.pdf

Carta Del Rilievo. (2000). Recuperado de <https://es.scribd.com/document/357872577/Carta-Del-Rilievo-2000>

CTS SRL. (Sin fecha). *Silical 110 goma silicona plasmable, productos*. Recuperado de <http://www.ctseurope.com/es/scheda-prodotto.php?id=624#>

David 3D. (Sin fecha), *David 4 Manual*. Recuperado de <http://www.david-3d.com/es/support/david4/print-version#white-balance>

Ecophon. (Sin fecha). *Reflectancia de la luz*. Recuperado de <http://www.ecophon.com/es/sobre-ecophon/propiedades-tecnicas1/Aspecto-visual/Light-reflectance/>

Eleukos. (Sin fecha). *Pioneros de la fotografía. Ontología de la escritura fotónica desde lo fotográfico. Principios, técnicas y materiales en lo fotográfico*. Recuperado de <https://eleukos.wordpress.com/principios/>

Epdlp. (Sin fecha). *Johann Joachim Winckelmann*. Recuperado de <http://www.epdlp.com/escritor.php?id=4657>

Factum Arte. (Sin fecha a). *La tumba de Seti. Tecnología digital para la conservación*. Recuperado de http://www.factum-arte.com/publications_PDF/SETI_small_book_english.pdf

Factum Arte. (Sin fecha b). *El escaneado en 3D para la conservación del patrimonio cultural. Una breve guía*. Recuperado de <http://www.factum-arte.com/pag/706/El-escaneado-en-3D-para-la-conservaci-n-del-patrimonio-cultural>

Factum Arte. (Sin fecha c). *Escaneado láser*. Recuperado de <http://www.factum-arte.com/pag/197/Escaneado-l-ser>

Factum Arte. (Sin fecha d). *Escaneado de luz blanca*. Recuperado de <http://www.factum-arte.com/pag/244/-p-Escaneado-de-luz-blanca--p->

Factum Arte. (Sin fecha e). *Sistema de Fotografía panorámica*. Recuperado de <http://www.factum-arte.com/pag/313/Sistema-de-fotografia-panoramica>

Faro Technologies, Inc.. (Sin fecha). *Tecnología de medición y documentación 3D de FARO*. Recuperado de <http://www.faro.com/es-es>

Feroxa S.A. (Sin fecha). *Siliconas para moldes*. Recuperado de http://www.feroca.com/es/estano-condensacion/598-silastic-3481-base-ag-de-curado.html?search_query=81F&results=3

Geodetic Systems, Inc. (Sin fecha). *Sistema de digitalización*. Recuperado de <http://www.nub3d.com/es/Sistema-de-Digitalizacion/our-technology/menu-id-131.html>

Go Scan 3D. (Sin fecha). *Jarrón cerámico*. Recuperado de <https://www.goscan3d.com/es/3d-models/vase-0>

González Fernández, A. (15 de noviembre de 2011). BT 7 Sistemas tradicionales de reproducción manual, puntómetro. [Entrada en Blog]. *Taller de talla en madera escuela de arte la Palma wood carving workshop art school*. Recuperado de http://tallerdetallaenmadera.blogspot.com.es/2011/11/bt-7-sistemas-de-reproduccion_15.html

González Fernández, A. (11 de mayo de 2013). Sistemas de reproducción manual. [Entrada en Blog]. *Taller de talla en madera escuela de arte la Palma wood carving workshop art school*. Recuperado de <http://tallerdetallaenmadera.blogspot.com.es/2013/05/antiguos-sistemas-de-reproduccion-manual.html>

Ikaslab, (2015). *Escaneo 3D con Digibuu paso a paso*. Recuperado de http://wiki.ikaslab.org/index.php/Escaneo_3D_con_Digibuu_paso_a_paso

Impresoras 3D.net. (Sin fecha). *Escáner 3D Minolta VI 910*. Recuperado de <http://www.impresoras3d.net/2009/11/escaner-3d-minolta-vi-910/>

Leica, (Sin fecha). *Sistema de metrología de superficies ópticas 3D Leica DCM 3D*. Recuperado de <http://www.leica-microsystems.com/es/productos/microscopios-opticos/industriales-y-de-materiales/microscopios-verticales/detalles/product/leica-dcm-3d/>

Multistation. (Sin fecha). *David SLS-2*. Recuperado de <http://www.multistation.com/DAVID-SLS-2>

Patrimonio Virtual. (9 de febrero de 2015). Estrategia de captura para fotogrametría digital. [Entrada en blog]. *Patrimonio virtual*. Recuperado de <http://www.patrimoniovirtual.com/2015/02/09/estrategia-de-captura-para-fotogrametria-digital/>

Photomuseum. (Sin fecha). *Daguerre y la invención de la fotografía*. Recuperado de <http://www.photo-museum.org/es/daguerre-invencion-foto/>

Rae. (2016). *Fotogrametría*. Recuperado de <http://dle.rae.es/?id=IK990wW>

Savinio. (22 de febrero de 2012). Máscaras mortuorias de personajes históricos. [Entreda en blog]. *Aryse*. Recuperado de <http://www.aryse.org/mascaras-mortuorias-de-personajes-historicos/>

Vídeos

Aparicio, P. [Pablo Aparicio Resco]. (20 de noviembre de 2015). *Proceso de creación del modelo 3D fotogramétrico de una pieza cerámica del Cerro Bilanero*. [Archivo de vídeo]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=rWzffxn6sOo>

David Vision Systems Gmbh. [David Vision Systems Gmbh]. (17 de marzo de 2015). *SLS-2 Tutorial 4 Scanning Texturing-David 3D Scanner* [Tutorial SLS-2 4 Scanning Texturing-David 3D Scanner]. [Archivo de vídeo]. Recuperado de <https://vimeo.com/122406222>

Factum Arte. [Factum Arte]. (22 de octubre de 2013). *Lucida 3D laser scanner, a portrait* [Escáner 3D Lucida, un retrato]. [Archivo de vídeo]. Recuperado de <https://vimeo.com/77507360>

Factum Arte. [Factum Arte]. (4 de marzo de 2012). *Lucida 3D Laser Scanner* [Escáner 3D Lucida]. [Archivo de vídeo]. Recuperado en: <https://vimeo.com/37918075>

Referencias capítulo 2

Libros, artículos de revistas y conferencias

Fernández Quesada, B. (2005). Luz y aspecto físico del color. En Gallego R. (Ed.), *Introducción al color* (pp. 25-37). Madrid, España: Akal.

García-Gómez, I., Fernández de Gorostiza, M. y Mesanza, A. (2011). Láser escáner y nubes de puntos. Un horizonte aplicado al análisis arqueológico de edificio. *Arqueología de la arquitectura*, 8, 25-44.

Espinel J. C. (2016). *Procesos digitales y sistemas de prototipado rápido aditivos aplicados a la creación escultórica de pequeño formato y relieves* (Tesis Doctoral). Universidad Complutense de Madrid, Madrid.

Libros, revistas y congresos online

Ángeles, M. (2011). Pintura y escultura digital 3d con ZBrush aplicada a la Arqueología. *Virtual Archaeology Review*, 2(3), 161-164. Recuperado de <https://polipapers.upv.es/index.php/var/article/view/4673/4807>

Arcusa, H. (2016). La fotogrametría como alternativa al registro de materiales arqueológicos: su aplicación en la cueva de Els Trocs y Valmayor XI. En Lorenzo, J. y Rodanés J. (Eds.), *I Congreso de Arqueología y Patrimonio Aragonés (CAPA)* (pp. 533-539). Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/304581921_LA_FOTOGRAFIETRIA_COMO_

ALTERNATIVA_AL_REGISTRO_DE_MATERIALES_ARQUEOLOGICOS_SU_APLICACION_EN_LA_CUEVA_DE_ELS_TROCS_Y_VALMAYOR_XI

Burrige, J. M., Collins, B. M., Galton, B. N., Halbert, A. R., Heywood T. R., Latham, W., ... Woodward J. R. (1989). The WINSOM solid modeler and its application to data visualization [El modelador de sólidos WINSOM y su aplicación a la visualización de datos]. *IBM Systems Journal*, 28 (4). Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/224102260_The_WINSOM_solid_modeller_and_its_application_to_data_visualization

Cignoni, P., Callieri, M., Corsini, M., Dellepiane, M., Ganovelli, F. & Ranzuglia G. (2008). MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool [MeshLab: una herramienta de procesamiento de malla de código abierto]. En Scarano V., de Chiara R. & Erra U. (Eds.), *Eurographics Italian Chapter Conference 2008* (pp. 129-136). <http://dx.doi.org/10.2312/LocalChapterEvents/ItalChap/ItalianChapConf2008/129-136>

De Rose, T., Kass M. & Truong, T. (1998). Subdivision Surfaces in Character Animation [Subdivision Surfaces en animación de personajes]. *SIGGRAPH '98, Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (pp. 85-94). Recuperado de <http://graphics.pixar.com/library/Geri/paper.pdf>

Díaz Gómez, F., Jiménez, J., Barreda, A., Asensi, B. y Hervás J. J. (2015). Modelado 3D para la generación de Patrimonio Virtual. *Virtual Archaeology Review*, 6(12), 30-37. Recuperado de polipapers.upv.es/index.php/var/article/download/4150/4278

Domínguez, I. A., Romero, Espinosa y Domínguez, M. (2013). Impresión 3D de maquetas y prototipos en arquitectura y construcción. *Revista de la Construcción*, 12(2), 39-53. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2013000200004>

García Molina, D. F. y de Paula, F. (2012). El Láser-Escáner 3D aplicado al patrimonio arquitectónico de Priego de Córdoba: la Torre del Homenaje. *Antiquitates*, 24, 277-302. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4099807.pdf>

Mañana-Borrazás, P., Rodríguez Paz, A. y Blanco-Rotea R. (2008). Una experiencia en la aplicación del Láser Escáner 3D a los procesos de documentación y análisis del Patrimonio Construido: su aplicación a Santa Eulalia de Bóveda (Lugo) y San Fiz de Solovio (Santiago de Compostela). *Arqueología de la arquitectura*, 5, 15-32. Recuperado de <http://digital.csic.es/bitstream/10261/15849/3/84.pdf>

Reilly, P. & Shennant, S. (1989). Applying solid modelling and animated three-dimensional graphics [Aplicación de modelado sólido y gráficos tridimensionales animados]. *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology Conferences* (pp. 158-165). Recuperado de http://proceedings.caaconference.org/files/1989/16_Reilly_Shennan_CAA_1989.pdf

Requicha, A. (1980). Representations for Rigid Solids: Theory, Methods, and Systems [Representaciones para Sólidos Rígidos: Teoría, Métodos y Sistemas]. *Computing Surveys*, 12(4), 437-464. doi: 10.1145/356827.356833

Sutherland, I. (2003). Sketchpad: A man-machine graphical communication system [Sketchpad: Un sistema de comunicación gráfica hombre-máquina]. *Technical Report*, 574. Recuperado de <https://www.cl.cam.ac.uk/techreports/UCAM-CL-TR-574.pdf>

Valle, J. M. y Rodríguez Miranda, A. (2011). Características básicas de los modelos tridimensionales de elementos históricos. *Revista ph, Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, 77, 145-148. Recuperado de <http://www.iaph.es/revistaph/index.php/revistaph/article/viewFile/3123/3123>

Recursos electrónicos

3Dsystems. (Sin fecha). *Geomagic Design X*. Recuperado de <https://es.3dsystems.com/software/geomagic-design-x>

3Dz. (Sin fecha). *Geomagic 3DZ*. Recuperado de https://www.3dz.es/product_manufacture/geomagic/?gclid=CjwKCAjw06LZBRBNEiwA2vgMVS58TKyy822-A_ACCJU6GefKTQQJIY1cCtWkXiDXOMqGSdOI02xKlRoCMJYQAvD_BwE

Abc. (Sin fecha). *Modelado 3D Clase 2 Conceptos fundamentales de la modelación 3D*. Recuperado de <http://abc.mitreum.net/wp-content/uploads/clase2-parte1-teoria.pdf>

Alaiza, A. (13 de junio de 2015). Vray: Conseguir el render perfecto. [Entrada en blog]. *Espai*. Recuperado de <http://www.espai.es/blog/2015/06/vray-conseguir-el-render-perfecto/>

Alegsa. (Sin fecha). *Definición de Animación 3D*. Recuperado de http://www.alegsa.com.ar/Dic/animacion_3d.php

American Machinist. (1998). *The CAD/CAM Hall of Fame. Three pioneers in the computer-aided design and manufacturing industry are recognized for their landmark contributions to the field* [El hall de la fama del CAD/CAM. Tres pioneros en la industria de diseño y fabricación asistida por computadora son reconocidos por sus contribuciones históricas al campo]. Recuperado de <http://americanmachinist.com/cadcam-software/cadcam-hall-fame>

Aparicio, P. (2017a). *Blender Cycles. Materiales*. Recuperado de <https://docs.google.com/presentation/d/12nf0WofCqZ83QsENDaIFII63GMY4QDDp-2cdCwLjvGI/edit#slide=id.p4>

Aparicio, P. (2017b). *Blender Cycles. Texturas*. Recuperado de https://docs.google.com/presentation/d/1oo_vRQ8wEsHFRrwaVbISVge0eRTz0T1nPfiRs5W8JXI/edit#slide=id.p4

Aprendiendo Xna. (Sin fecha). *Sistema de coordenadas 3D*. Recuperado de <https://aprendiendoxna.wordpress.com/articulos/xna/sistema-de-coordenadas-3d/>

Arc Gis. (Sin fecha). *¿Qué son los datos ráster?* Recuperado de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>

Artuza, J. (13 de abril de 2011). *¿Qué es Rigging?* [Entrada en blog]. *Johan Arzuza*. Recuperado de <http://www.artuza.com/2011/04/character-animation-technical-director.html>

Autodesk. (Sin fecha a). *Compañía*. Recuperado de <http://latinoamerica.autodesk.com/adsk/servlet/index?id=12009676&siteID=7411870>

Autodesk. (Sin fecha b). *Maya*. Recuperado de <http://www.autodesk.es/products/maya/features/all>

Baldasano, J., Gassó, S. y Colina, F. (Sin fecha). *Diseño asistido por ordenador (CAD)*. Recuperado de <http://www.unizar.es/aeipro/finder/INGENIERIA%20DE%20PRODUCTOS/BF04.htm>

Blender. (Sin fecha). *Blender 2.78* [Blender 2.78]. Recuperado de <https://www.blender.org/features/2-78/>

Castor. (Sin fecha). *Historia e evolución del CAD/CAM*. Recuperado de http://www.castor.es/historia_CAD_CAM.html

DigitalOcean. (22 de agosto de 2016). *Who created Computer-aided manufacture (CAM)?* [¿Quién creó la fabricación asistida por computadora (CAM)?]. [Entrada en blog]. *Quora*. Recuperado de <https://www.quora.com/Who-created-Computer-aided-manufacture-CAM>

Educación 3.0 (14 de febrero de 2018). *¿Quieres aprender a modelar en 3D? 10 programas gratuitos para iniciarse*. [Entrada en blog]. *Educacion 3.0*. Recuperado de <http://www.educaciontrespuntocero.com/recursos/software-programas-aprender-diseno-3d/30654.html>

Eiteljorg, H. (1988). *Computing Assisted Drafting and Design: new technologies for old problems* [Computing Assisted Drafting and Design: Nuevas tecnologías para viejos problemas]. Recuperado de <http://csanet.org/inftech/cadbkl.html>

Ejezeta. (13 de julio de 2014). Tutorial/ Introducción al Unwrap UVW. [Entrada en blog]. *Ejezeta*. Recuperado de <http://www.ejezeta.cl/2014/07/13/tutorial-introduccion-al-unwrap-uvw/>

Fernández Ruiz, M. (2011). *Modelado, texturizado y ajuste de malla*. Recuperado de http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/12936/modelado_fernandez_2011_pp.pdf;jsessionid=EA85A669B542C513CB121F571973394F?sequence=1

González, J.C. (3 de diciembre de 2013). Sketchpad cumple 50 años, cuando Sutherland soñó con el diseño asistido por ordenador. [Entrada en blog]. *Xataka*. Recuperado de <https://www.xataka.com/otros/sketchpad-cumple-50-anos-cuando-sutherland-sono-con-el-diseno-asistido-por-ordenador#comments>

History Computer. (Sin fecha a). *The Dynabook of Alan Kay* [El Dynabook de Alan Kay]. Recuperado de <http://history-computer.com/ModernComputer/Personal/Dynabook.html>

History Computer. (Sin fecha b). *Sketchpad of Ivan Sutherland* [Sketchpad de Ivan Sutherland]. Recuperado de <http://history-computer.com/ModernComputer/Software/Sketchpad.html>

Junkie, T. (2016). *Autocad 3D en PDF y español, Manuales y tutoriales 10*. Recuperado de <http://manualesytutoriales10.com/autocad-3d-pdf-espanol/>

Kay, A. (1972). *A personal Computer for children of all ages* [Un ordenador personal para niños de todas las edades]. Recuperado de http://www.vpri.org/pdf/hc_pers_comp_for_children.pdf

Lazalde, A. (5 de abril de 2011). Historia de la tecnología: Dynabook, la tablet original. [Entrada en blog]. *Hipertextual*. Recuperado de <https://hipertextual.com/2011/04/historia-tecnologica-dynabook-la-tablet-original>

Luna, A. (2012). *Iluminación y raytracing con YafaRay*. Recuperado de https://docs.google.com/document/d/1yHAPvBsAOgJFhFiZpWiheV8oJ1uEJt_jtGyyWH3rMjE/edit#heading=h.ipnpw4w66nvr

Mastermagazine. (Sin fecha). *Definición de CRT*. Recuperado de <http://www.mastermagazine.info/termino/4482.php>

Meshlab. (Sin fecha). *Features* [Características]. Recuperado de <http://www.meshlab.net/>

Olachea O. (15 de octubre de 2014). 6 de las mejores opciones de programas para el modelado en 3D. [Entrada en blog]. *Paredro*. Recuperado de <http://www.paredro.com/6-buenas-opciones-de-programas-para-el-modelado-en-3d/>

Oscillon Online. (Sin fecha). *Iniciación al Modelado con Blender*. Recuperado de http://www.oscillononline.com/pdfs/blender/temario_blender.pdf

Patrimonio Virtual. (2015). *Integración y soporte de opensubdiv en Blender*. Recuperado de <http://www.patrimoniovirtual.com/2015/12/14/integracion-y-soporte-de-opensubdiv-en-blender/>

Pedersen, M. (Sin fecha). *Capítulo 11: Iluminación, Wiki-Blender* (Alcántara, J.). Recuperado de https://wiki.blender.org/index.php/Doc:ES/2.4/Books/Essential_Blender/11.2.Lighting:_Discussion

Ribbonsoft. (Sin fecha). *Manual de Referencia del Usuario de QCad*. Recuperado de <https://www.ribbonsoft.com/doc/qcad/2.2/reference/es/tema04.html>

Rossignac, J. R. & Requicha, A. G. (Sin fecha). *Solid Modeling* [Modelado sólido]. Recuperado de <http://www.cc.gatech.edu/~jarek/papers/SolidModelingWebster.pdf>

Santi. (22 de enero de 2010). 3D para todos #7. El proceso de texturizado. [Entrada en blog]. *Santi Orozco*. Recuperado de <http://www.santiorozco.com/2010/01/3d-para-todos-7-el-proceso-de-texturizado/>

Shina, S. (10 de mayo, 2013). *¿Qué es el Vray y para qué sirve?* [Entrada en blog]. *Arquigrafico*. Recuperado de <http://www.arkigrafico.com/que-es-el-vray-para-que-sirve/>

Sinapsis. (Sin fecha). *ZBrush*. Recuperado de <http://sinapsisonline.com/productos/zbrush/>

Solidworks Corp. (Sin fecha a). *3D Solid Modeling* [Modelado sólido 3D]. Recuperado de <http://www.solidworks.com/sw/products/3d-cad/3d-solid-modeling.htm>

Solidworks Corp. Sin fecha b). *Historia de la empresa*. Recuperado de https://www.solidworks.es/sw/656_ESN_HTML.htm

Soriano, A. (2 de octubre de 2014). Cómo crear texturas apilables (seamless). [Entrada en blog]. *Alsomar*. Recuperado de <http://www.alsomar.com/2014/10/como-crear-texturas-apilables-seamless/>

Textures.com. (Sin fecha). *Home* [Inicio]. Recuperado de <http://www.textures.com/>

Tinkercad. (Sin fecha). *3D Design Gallery* [Galería de diseño 3D]. Recuperado de <https://www.tinkercad.com/things/featured>

Uciencia. (Sin fecha). *Tarjetas Perforadas*. Recuperado de <http://www.uciencia.uma.es/Coleccion-cientifico-tecnica/Informatica/Galeria/Tarjetas-perforadas>

Vila, C. (noviembre de 2000). Introducción a la animación 3D, Étere training. [Entrada en blog]. *ÉtereTraining*. Recuperado de http://www.etereaestudios.com/training_img/intro_3d/intro_3d.htm

Warehouse. (Sin fecha). *Bienvenido a la Almacén de extensiones*. Recuperado de <http://extensions.sketchup.com/es>

Yafaray. (Sin fecha). *Home* [Inicio]. Recuperado de <http://www.yafaray.org/>

Vídeos

Aparicio, P. [Pablo Aparicio Resco]. (15 de febrero de 2017). *Lámparas (I): Sol*. [Archivo de vídeo]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=EdiDXemDYTk&t=>

Bigkif. [Bigkif]. (17 de noviembre de 2007). *Ivan Sutherland: Sketchpad Demo (1/2)* [Ivan Sutherland: demostración de Sketchpad (1/2)]. [Archivo de vídeo]. Recuperado de https://www.youtube.com/watch?v=USyoT_Ha_bA

Carrol, D. [David Carroll]. (16 de julio de 2007). *Sketchpad, by Dr. Ivan Sutherland with comments by Alan Kay* [Sketchpad, por el Dr. Ivan Sutherland con comentarios de Alan Kay]. [Archivo de vídeo]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=495nCzxM9PI>

Children's Technology Review. [Children's Technology Review]. (21 de diciembre de 2009). *Alan Kay's Dynabook -- Rare NHKvideo* [Dynabook de Alan Kay-- Rare NHKvideo]. [Archivo de vídeo]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=r36NNGzNvjo>

Fong, R. [Ronal Fong]. (14 de abril de 2014). *Rigging for Animation. Demo Reel* [Rigging para la animación. Demo Reel]. [Archivo de vídeo]. Recuperado de https://www.youtube.com/watch?v=6gFcE_qYMXA

Referencias capítulo 3

Libros, artículos de revistas y conferencias

Espinel, J. C. (2016). *Procesos digitales y sistemas de prototipado rápido aditivos aplicados a la creación escultórica de pequeño formato y relieves* (Tesis Doctoral). Universidad Complutense de Madrid, Madrid.

Horie, C.V. (1987). *Materials for conservation. Organic consolidants, adhesives and coatings* [Materiales de conservación. Consolidantes orgánicos, adhesivos y recubrimientos]. London: Butterworths.

Pereira, C. (1999b). Facsímiles de objetos de arte tridimensional 2º Parte: Vaciado. *Restauración & Rehabilitación*, 26, 66-71.

Libros, revistas y congresos online

Ávila, M. (2017). Aplicación de la tecnología 3d a la restauración, conservación y documentación del patrimonio cultural. En Comité Científico EMERGE 2016 (Eds.), *Actas de Jornadas de Investigación Emergente en Conservación y Restauración del Patrimonio, Emerge 2016* (pp. 192-199). Valencia, España. Recuperado de http://emerge.blogs.upv.es/files/2017/04/LIBRO-ACTAS-EMERGE-2016_07_04_17.pdf

Infante, R. (2012). *Procesos de conformado de materiales poliméricos por prototipado rápido* (Trabajo Fin de Máster del Máster Ciencia y tecnología de polímeros de la

Universidad Nacional de Educación a Distancia). UNED. Recuperado de <https://tfmrimuned.wordpress.com/>

Santos, S. (2017). El empleo de las tecnologías 3D en la conservación del patrimonio y su aplicación en la realización de reproducciones de bienes culturales. *Observar*, 1(11), 97-114. Recuperado de <http://www.observar.eu/site/new.php?nid=90>

Recursos electrónicos

3DSystems. (Sin fecha). *Impresoras 3D para plástico*. Recuperado de <https://es.3dsystems.com/3d-printers/plastic#selective-laser-sintering-printers-sls>

Aldabaldetrecu, P. (1 de febrero 2002). Evolución técnica de la máquina-herramienta. Reseña histórica. [Entrada en blog]. *Interempresas*. Recuperado de <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/1435-Evolucion-tecnica-de-la-maquina-herramienta-Resena-historica.html>

American Machinist. (1998). *The CAD/CAM Hall of Fame. Three pioneers in the computer-aided design and manufacturing industry are recognized for their landmark contributions to the field* [El hall de la fama del CAD/CAM. Tres pioneros en la industria de diseño y fabricación asistida por computadora son reconocidos por sus contribuciones históricas al campo]. Recuperado de <http://americanmachinist.com/cadcam-software/cadcam-hall-fame>

Ardila, J. G. (2007). *Manufactura por capas: Prototipado rápido. Layered manufacturing: Rapid prototyping*. Recuperado de <http://www.ilustrados.com/documentos/manufactura-capas-prototipado-rapido-050208.pdf>

Burón, D. (4 de diciembre de 2013). Impresión 3D: Qué materiales usar y dónde comprarlos. [Entrada en blog]. *Silicon*. Recuperado de <http://www.silicon.es/impresion-3d-que-materiales-usar-y-donde-comprarlos-50135>

CadCamCae. (Sin fecha). *¿Qué es el CNC?* Recuperado de <https://cadcamcae.wordpress.com/2007/06/14/el-control-numerico-por-computadora-el-cnc/>

CustomPartNet. (2008). *Inkjet Printing*. Recuperado de <http://www.custompartnet.com/wu/ink-jet-printing>

Del Fresno, D. (27 de enero de 2017). Artes Gráficas: Integral 3D Printing y Estudios Durero presentan la Stratasys J750. [Entrada en blog]. *Moby 3Dick*. Recuperado de <http://moby3dick.blogspot.com.es/2017/01/artes-graficas-integral-3d-printing-y.html>

Ec International Group. (Sin fecha). *SLA/ SLA HD*. Recuperado de http://www.ec-international.es/sla-es?gclid=Cj0KCQjwj6PKBRCAARIsALU_3EbixBvTtIOMPnt5qT2Q7ZrbunGrAvbmkyde_c4nv_-C8pn0DYYhpMgaAp_lEALw_wcB

Estudios Durero. (Sin fecha). *Impresión 3D full color, Stratasys J750 de Estudios Durero*. Recuperado de http://www.estudiosdurero.com/estudios_durero/opencms/Presentaciones/3D_printing_full_color.html?idioma=es

Factum Arte. (Sin fecha). *Fresado*. Recuperado de <http://www.factum-arte.com/pag/568/Fresado>

Fundación Telefónica. (2017). *3D Imprimir el mundo*. Recuperado de https://espacio.fundaciontelefonica.com/wp-content/uploads/2017/02/guia_practica_3d.pdf

Gómez, J. D. (20 de febrero de 2013). 3Doodler: El primer lápiz de impresión 3D del mundo. [Entrada en blog]. *FuriaMag*. Recuperado de <http://www.furiamag.com/3doodler-el-primer-lapiz-de-impresion-3d-del-mundo/>

Impresiontresde. (2013). *9 aplicaciones médicas de la impresión 3D*. Recuperado de <http://impresiontresde.com/9-aplicaciones-medicas-de-la-impresion-3d/>

Impresiontresde. (2016). *Prototipado rápido con impresión 3D: cómo ganar ventaja a la competencia*. Recuperado de <http://impresiontresde.com/prototipado-rapido-impresion-3d-ventajas/>

Impresoras3D. (Sin fecha). *Filamentos*. Recuperado de <https://www.impresoras3d.com/filamento/>

Kuka Robots Ibérica. (Sin fecha). *Kuka*. Recuperado de <http://www.kukarobotics.com/spain/es/>

Leon3D. (Sin fecha). *Guía de resolución de problemas*. Recuperado de <http://www.leon-3d.es/guia-de-resolucion-de-problemas/>

Llorca, A. (2015). Cuáles son los mejores materiales para imprimir en 3D. [Entrada en blog]. *MediaTrends*. Recuperado de <https://www.mediatrends.es/a/40090/mejores-materiales-imprimir-3d/>

Macias C. (10 de noviembre de 2008). Torno paralelo. [Entrada de blog]. *Modeleria Ind.* Recuperado de <http://modeleriaind.blogspot.com.es/2008/11/este-torno-de-mecnico-se-construye-con.html>

Mizar. (20 de junio de 2016). Fabricación aditiva vs. Impresión 3D. [Entrada en blog]. *Blog*. Recuperado de <http://mizaradditive.com/impresion-3d/>

Megamex. (Sin fecha). *Inconel Aleación 625. Aleación de níquel 625*. Recuperado de http://megamex.com/span/inconel_625.html

R3ald. (Sin fecha). *¿Qué es un fichero stl?* Recuperado de <http://www.r3ald.com/que-es-un-fichero-stl>

Ramírez, M. (3 de junio de 2015a). Tratamientos superficiales post-impresión (I). Tratamientos mecánicos. [Entrada en blog]. *Dima3D*. Recuperado de <http://www.dima3d.com/tratamientos-superficiales-post-impresion-i-tratamientos-mecanicos/>

Ramírez, M. (11 de junio de 2015b). *Tratamientos superficiales post-impresión (II). Tratamientos térmicos*. [Entrada en blog]. *Dima3D*. Recuperado de <http://www.dima3d.com/tratamientos-superficiales-post-impresion-ii-tratamientos-termicos/>

Ramírez, M. (25 de junio de 2015c). *Tratamientos superficiales post-impresión (III). Tratamientos químicos (I)*. [Entrada en blog]. *Dima3D*. Recuperado de <http://www.dima3d.com/tratamientos-superficiales-post-impresion-iii-tratamientos-quimicos-i/>

Ramírez, M. (2 de julio de 2015d). Tratamientos superficiales post-impresión (IV). Tratamientos químicos (II). [Entrada en blog]. *Dima3D*. Recuperado de <http://www.dima3d.com/tratamientos-superficiales-post-impresion-iv-tratamientos-quimicos-ii/>

Roig, D. (2006). *Prototipado rápido e innovación*. Recuperado de http://www.cea.es/UPLOAD/INNOVACION/RECURSOS/INNO_495_Descripcion%20de%20prototipado%20rapido%20y%20sus%20clases.pdf

Rsd. (2017). *Un sin fin de posibilidades con el embalaje por impresión 3D*. Recuperado de <http://www.egrafica.unizar.es/Ingegraf/pdf/Comunicacion17068.pdf>

Sanchez Jiménez, F. J., Fernández, A. y Llorente, J. (Sin fecha). *Técnicas de prototipado rápido*. Recuperado de <http://www.egrafica.unizar.es/Ingegraf/pdf/Comunicacion17068.pdf>

Sánchez, S. (11 de julio de 2016). Sinterizado directo de metal por láser, te explicamos todo. [Entrada en blog]. *3Dnatives*. Recuperado de <http://www.3dnatives.com/es/sinterizado-directo-de-metal-por-laser-les-explicamos-todo/>

Spain Bussines. (Sin fecha). *Herramientas para crear*. Recuperado de http://www.spainbusiness.com.br/icex/cda/controller/pageGen/0,3346,1559872_6406806_6414670_4259296,00.html

Stratasys. (Sin fecha). *¿Qué es el prototipado rápido?* Recuperado de <http://www.stratasys.com/es/resources/rapid-prototyping>

Trecool. (8 de abril de 2014). Lix 3D Printing pen: Bolígrafo para dibujar en 3D. [Entrada en blog]. *Trecool*. Recuperado de <http://trecool.es/2014/04/lix-3d-printing-pen-boligrafo-para-dibujar-en-3d.html>

Trimaker. (2017a). *Casas impresas en 3D*. Recuperado de <https://trimaker.com/arquitectura-casas-impresas-en-3d/>

Trimaker. (2017b). *España: construyen un puente con impresión 3D*. Recuperado de <https://trimaker.com/category/arquitectura/>

Velásquez, J. A. (2011). *Tecnología para el prototipado rápido: Impresoras 3D. Paradigmas*. Recuperado de kimerius.com/app/.../Tecnología+para+el+prototipado+rápido.+Impresoras+3D.pdf

Referencias capítulo 4

Libros, artículos de revistas y conferencias

Morales, C. y Egsgaard, H. (2010). Caso de estudio: limpieza de una muñeca de PVC con signos de degradación. En Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía y Grupo Español de Conservación (Eds.). *11ª Jornada de Conservación de Arte Contemporáneo* (pp.83-92). Madrid, España.

Stanco, F. & Tanasi, D. (2011). Experiencing the Past: Computer Graphics in Archaeology [Experimentando el pasado: gráficos por computadora en arqueología]. In Gallo, G., La Rosa, V., Stanco, F. & Tanasi, D. (Eds.). *Digital imaging for cultural heritage preservation: analysis, restoration and reconstruction of ancient works*. Florida, FL: CRC Press.

Miller, P. & Richards, J. (1994). The good, the bad, and the downright misleading: archaeological adoption of computer visualization [Lo bueno, lo malo y lo francamente engañoso: la adopción arqueológica de la visualización por computadora]. In Huggett, J. & Ryan, N. (Eds) *Computer Applications in Archaeology* (BAR International Series 600) (pp, 19-22). Oxford, England: Tempus Reparatum.

Pérez Martínez F. J. (2011). Presente y Futuro de la Tecnología de la Realidad Virtual. *Creatividad y Sociedad*. nº XVI, 1-39.

Reilly, P. & Rahtz, S. (2005). *Archaeology and the information age* [Arqueología y la era de la información]. New York, NY: Taylor & Francis e-Library.

Rubio, M. J. y Fernández Tapia, D. (2014). La accesibilidad universal en el Museo Arqueológico Nacional: un museo para todos. *Boletín del Museo Arqueológico Nacional* 32, 570-591.

Stanco, F. & Tanasi, D. (2011). Experiencing the Past: Computer Graphics in Archaeology [Experimentando el pasado: gráficos por computadora en arqueología]. In Gallo, G., La Rosa, V., Stanco, F. & Tanasi, D. (Eds.). *Digital imaging for cultural heritage preservation: analysis, restoration and reconstruction of ancient works*. Florida, FL: CRC Press.

Libros, revistas y congresos online

Al-kheder, S., Al-shawabkeh, Y. & Haala, N. (2009). Developing a documentation system for desert palaces in Jordan using 3D laser scanning and digital photogrammetry [Desarrollo de un sistema de documentación para palacios del desierto en Jordania usando escáner láser 3D y fotogrametría digital]. *ELSEVIER, Journal of Archaeological Science*, 36(2), 537-546. doi:10.1016/j.jas.2008.10.009

Allen, P., Feiner, S., Troccoli, A., Benko, H., Ishak, E. & Smith, B. (2004). Seeing into the Past: Creating a 3D Modeling Pipeline for Archaeological Visualization [Ver en el pasado: Creación de un canal de modelado 3D para la visualización arqueológica]. *Proceedings of the 2nd International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission* (pp.6-9). Recuperado de <http://www.cs.columbia.edu/~allen/PAPERS/3dpvt04.1.pdf>

Angás, J. (2011). Valorización, difusión y estandarización de la documentación geométrica del patrimonio. En Domingo, M. y Sánchez A. (Eds.). *Documentación Gráfica del Patrimonio* (pp. 154-163). Recuperado de <http://es.calameo.com/read/0000753358b142b1c934c>

Arcusa, H., Rojo, M. A., Royo, J. I., Tejedor, C., García Martínez, I. y Garrido. R. (2016). La fotogrametría como alternativa al registro de materiales arqueológicos: su aplicación en la cueva de els trocs y valmayor XI. *Actas 24 y 25 de noviembre de 2015, I Congreso Arqueología y Patrimonio Aragonés (CAPA)* (pp. 533-539). Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/304581921_La_fotogrametria_como_alternativa_al_registro_de_materiales_arqueologicos_su_aplicacion_en_la_cueva_de_Els_Trocs_y_Valmayor_XI

Ávila, M. (2017). Aplicación de la tecnología 3d a la restauración, conservación y documentación del patrimonio cultural. En Universitat Politècnica de Valencia (Ed.), *Actas de Jornadas de Investigación Emergente en Conservación y Restauración del Patrimonio, Emerge 2016*, (pp. 192-199). Valencia, España. Recuperado de http://emerge.blogs.upv.es/files/2017/04/LIBRO-ACTAS-EMERGE-2016_07_04_17.pdf

Baceiredo, V. y Baceiredo, D. (2011). Levantamiento en ortoimágenes de nube de puntos de las Termas y Bóvedas Romanas de Guadalmina en Marbella (Málaga). Levantamiento en ortofotografías de los paramentos que componen el ámbito basilical del Salón de Abd al-Rahman III en Madinat al-Zahra (Córdoba) y levantamiento tridimensional del Dolmen de Menga en Antequera (Málaga). En Domingo, M. y Sánchez A. (Eds.). *Documentación Gráfica del Patrimonio* (pp. 130-143). Recuperado de <http://es.calameo.com/read/0000753358b142b1c934c>

Barraca, P. (1994), Algunos aspectos de la documentación en los Museos. *Boletín de la ANABAD*, Tomo 44(1), 135-151. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/50875.pdf>

Bravo, M. A. (1997). Documentación o investigación. *Museo*, 2,91-94. Recuperado de http://www.apme.es/revista/museo02_091.pdf

Cabrelles, M., Lerma, J. L., Navarro Tarín, S. y Seguí, A. E. (2013). Modelado fotorrealístico 3D a partir de procesos fotogramétricos: láser escáner versus imagen digital. *Cuadernos de Arte Rupestre*, 6, 85-90. Recuperado de http://www.cuadernosdearterupestre.es/arterupestre/6/LermaCAR2012_06_08.pdf

Fernández Moreno, J. J., Burón, M., Escudero, C., Benito, J. P., Sanz, A. y Tabernero, C. (2013). La estación rupestre al aire libre de Siega Verde: nuevas técnicas para documentar viejos grabados. En Junta de Castilla y León y Consejería de Cultura y Turismo (Eds.). *Actas VIII Congreso Internacional AR&PA 2012* (pp.202-214). Recuperado de <http://www.jcyl.es/web/jcyl/binarios/613/71/actasAR&PA2012.pdf?>

Cano, P., Lamolda, F., Torres, J. C. y Villafranca, M. M. (2010). Uso de escáner láser 3D para el registro del estado previo a la intervención de la Fuente de los Leones de La Alhambra. *Virtual Archaeology Review*, 1(2), pp. 89-94. doi:<https://doi.org/10.4995/var.2010.4695>

Campana, S. (2014). 3D modeling in archaeology and cultural heritage- Theory and best practice [Modelado 3D en arqueología y patrimonio cultural - Teoría y mejores prácticas]. In Redondino, F. & Campana, S. (Eds.), *3D Recording and Modelling in Archaeology and*

Cultural Heritage. Theory and best practices (pp. 7-12). British Archaeological Reports. Recuperado de

https://www.academia.edu/5719952/3D_Modeling_in_Archaeology_and_Cultural_Heritage_Theory_and_Best_Practices?auto=download

Dell Unto, N. (2014). The Use of 3D Models for Intra-Site Investigation in Archaeology [El uso de modelos 3D para la investigación dentro del sitio en arqueología]. In Redondino, F. & Campana, S. (Eds.), *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage. Theory and best practices* (pp. 151-158). British Archaeological Reports. Recuperado de

https://www.academia.edu/5719952/3D_Modeling_in_Archaeology_and_Cultural_Heritage_Theory_and_Best_Practices?auto=download

Dietz, C., Catanzariti, G., De la Presa, P. y Jimeno, A. (2011). Técnicas no invasivas para el registro del patrimonio arqueológico. En Domingo, M. y Sánchez A. (Eds.). *Documentación Gráfica del Patrimonio* (pp. 118-129). Recuperado de <http://es.calameo.com/read/0000753358b142b1c934c>

Forte, M. (2014). Virtual reality, cyberarchaeology, teleimmersive archaeology [Realidad virtual, ciberarqueología, arqueología teleinmersiva]. In Redondino, F. & Campana, S. (Eds.), *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage. Theory and best practices* (pp. 115-129). British Archaeological Reports. Recuperado de https://www.academia.edu/5719952/3D_Modeling_in_Archaeology_and_Cultural_Heritage_Theory_and_Best_Practices?auto=download

Galeazzi, F., Di Giuseppantonio, P. & Matthews, J. L. (2015). Comparing 2D pictures with 3D replicas for the digital preservation and analysis of tangible heritage [Comparación de imágenes 2D con réplicas 3D para la preservación digital y el análisis del patrimonio tangible]. *Museum Management and Curatorship*, 30(5), 462-483. Recuperado de www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/0047775.2015.1042515

García Molina, D. F., y de Paula, F. (2012). El Láser-Escáner 3D aplicado al patrimonio arquitectónico de Priego de Córdoba: La Torre del Homenaje. *Antiqvitaes*, 24. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4099807.pdf>

Grande, A. (2013). La realidad virtual aplicada a la investigación y difusión. En Junta de Castilla y León y Consejería de Cultura y Turismo (Eds.) *Actas VIII Congreso Internacional AR&PA 2012* (pp.6-21). Recuperado de <http://www.jcyl.es/web/jcyl/binarios/613/71/actasAR&PA2012.pdf>

Harris, T. (1987). Digital Terrain Modelling and three-dimensional surface graphics for landscape and site analysis in archaeology and regional planning [Modelado digital de terreno y gráficos de superficie tridimensionales para el análisis de paisaje y sitio en arqueología y planificación regional]. *Computer applications and quantitative methods in archaeology* (pp.161-172). Recuperado de http://proceedings.caaconference.org/files/1987/16_Harris_CAA_1987.pdf

Heuman, J. & Morgan L. (2007). Tate Sculpture Replica Project [Tate Sculpture Replica Project]. *Tate Paper*, 8. Recuperado de <http://www.tate.org.uk/research/publications/tate-papers/08/tate-sculpture-replica-project>

Hung-Ming, C., Ya-Ning, Y., Min-Bin, C. & Wun-Bin Y. (2010). A Processing for Digitizing Historical Architecture [Un procesamiento para digitalizar la arquitectura histórica]. *Digital Heritage*, 6436, 1-12. Recuperado de <http://www.cut.ac.cy/euromed2016proceedings/pdf/2010/fullPapers2010.pdf>

Jiménez, J. G., García, M., Revelles J. y Melero, F. J. (2012). Digitalización 3D y Difusión en Web del Patrimonio de las Universidades Andaluzas mediante X3D Y WebGL. *Virtual Archaeology Review*, 3 (7), 55-59. doi: <https://doi.org/10.4995/var.2012.4386>

Koroso, I. (2013). Registro y gestión de la información geométrica y temática en la restauración de la Catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz. En Junta de Castilla y León y Consejería de Cultura y Turismo (Eds.) *Actas VIII Congreso Internacional AR&PA 2012* (pp.192-201). Recuperado de <http://www.jcyl.es/web/jcyl/binarios/613/71/actasAR&PA2012.pdf>

Letellier, R. (2007). Acknowledgments [Agradecimientos]. In Escobar, A. (Ed.) *Recording, Documentation, and Information Management for the Conservation of Heritage Places guiding principles* (pp.12-13). Los Ángeles, CA: The Getty Conservation

Institute. Recuperado de http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/pdf/guiding_principles.pdf

Lerma, J. L. Cabrelles, M., Navarro, S. y Seguí, A. E. (2011). La documentación patrimonial mediante sensores de imagen o de barrido láser. En Domingo, M. y Sánchez A. (Eds.). *Documentación Gráfica del Patrimonio* (pp. 108-117). Recuperado de <http://es.calameo.com/read/0000753358b142b1c934c>

evoy, M., Pulli, K., Curless B., Rusinkiewicz, S., Koller, D., Pereira L., ...Fulk, D. (2000). The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues [The Digital Michelangelo Project: Escaneo 3D de grandes estatuas]. *SIGGRAPH '00 Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (pp.131-144). Recuperado de <https://graphics.stanford.edu/papers/dmich-sig00/dmich-sig00-nogamma-comp-low.pdf>

Lodeiro, J. M. (2011). La documentación gráfica en el IPCE. En Domingo, M. y Sánchez A. (Eds.). *Documentación Gráfica del Patrimonio* (pp. 8-17). Recuperado de <http://es.calameo.com/read/0000753358b142b1c934c>

Loscos, C., Tecchia, F., Frisoli, A., Carrozzino, M., Ritter, H., Swapp, D. & Bergamascon M. (2004). The Museum of Pure Form: touching real statues in an immersive virtual museum [El Museo de la Forma Pura: tocar estatuas reales en un museo virtual inmersivo]. *The 5th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST*. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/85cc/88dd1743e6dba376d6c156c01df94f7d2669.pdf>

Madrigal, A. (2013). *Desenterrar el pasado. Introducción al Patrimonio Arqueológico*. Folgueira Hernández, M. (Ed.). Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, Colección Aula Mentor, Serie Cultura y Formación. Recuperado de <https://sede.educacion.gob.es/publiventa/PdfServlet?pdf=VP16202.pdf&area=E>

Marín, M. T. (1999). La documentación museográfica en el Reino Unido: tendencias actuales. *IMAFRONTE*, 14, 141-154. Recuperado de <http://revistas.um.es/imafronte/article/viewFile/38381/36881>

Molina, J. y Jordá, J. F. (2016). Apuntes sobre la digitalización y la reconstrucción virtual del castro de San Chuis (Allande, Asturias, España). *Virtual Archaeology Review*, 7(15), 98-111. doi: <https://doi.org/10.4995/var.2016.5866>

Nagel, L. (Sin fecha). Registro y documentación. *Manual de registro y documentación de bienes culturales*, (pp. 8-12). Recuperado de http://www.aatespanol.cl/taa/publico/ftp/archivo/MANUAL_WEB.pdf

Reilly, P. (1990). Towards a virtual archaeology. Computer Applications in Archaeology [Hacia una arqueología virtual. Aplicaciones informáticas en arqueología]. In Lockyear K. and S. Rahtz (Eds.) *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology 1990 (BAR International Series 565)*. Oxford: British Archaeological reports (pp. 133-139). Recuperado de http://proceedings.caaconference.org/files/1990/21_Reilly_CAA_1990.pdf

Rodriguez Echavarria, K. & Kaminski J. (2012). Deploying 3D technologies for the documentation of tangible cultural heritage [Implementación de tecnologías 3D para la documentación del patrimonio cultural tangible]. *Virtual Archaeology Review*, 3(5), 116-120. doi: <https://doi.org/10.4995/var.2012.4539>

Sánchez Climent, A. y Cerdeño, M. L. (2014). Propuesta metodológica para el estudio volumétrico de cerámica arqueológica a través de programas free-software de edición 3D: el caso de las necrópolis celtibéricas del área meseteña. *Virtual Archaeology Review*, 5(11), 20-33. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5210208>

Santana, M. (2014). Introduction [Introducción]. In Redondino, F. & Campana, S. (Eds.), *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage. Theory and best practices* (pp. 3-4). British Archaeological Reports. Recuperado de https://www.academia.edu/5719952/3D_Modeling_in_Archaeology_and_Cultural_Heritage_Theory_and_Best_Practices?auto=download

- Sophocleous, C., Marini, L., Georgiou, R., Elfarargy, M. & Mchenry, K. (2017). Medici 2: A Scalable Content Management System for Cultural Heritage Datasets [Medici 2: Un sistema de gestión de contenido escalable para conjuntos de datos de patrimonio cultural]. *Code4lib Journal* (36). Recuperado de <http://journal.code4lib.org/articles/12317>
- Seoane, J. A y Hernández Ibáñez, L. A. (2012). Integración de SIG con visualización 3D interactiva para la gestión y seguimiento de excavaciones arqueológicas. *Virtual Archaeology Review*, 3(5), 58-62. Recuperado <http://polipapers.upv.es/index.php/var/article/view/4508/4657>
- Valle, J. M. y Rodríguez Miranda A. (2011). Características básicas de los modelos tridimensionales de elementos históricos. *Revista PH. Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, 77 Monográfico, 145-148. Recuperado de www.iaph.es/revistaph/index.php/revistaph/article/viewFile/3123/3123
- Van Riel, S. (2016). *Exploring the use of 3D GIS as an analytical tool in archaeological excavation practice* [Explorando el uso de 3D GIS como herramienta analítica en la práctica de excavación arqueológica] (Tesis Doctoral). Universidad Lund, Suecia. Recuperado de <http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=8876753&fileId=8876759>
- Whalen, T. (2007). Foreword [Prefacio]. In Escobar, A. (Ed.) *Recording, Documentation, and Information Management for the Conservation of Heritage Places guiding principles* (pp.12-13). Los Ángeles, CA: The Getty Conservation Institute. Recuperado de http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/pdf/guiding_principles.pdf
- Wilder, C. (1 de marzo de 2016). Swiping a Priceless Antiquity... With a Scanner and a 3-D Printer. [Golpeando una antigüedad inapreciable ... con un escáner y una impresora tridimensional]. *The New York Times.com*. Recuperado de <https://www.nytimes.com/2016/03/02/arts/design/other-nefertiti-3d-printer.html?mcubz=0>

Williams, N. & Williams G., (2007). Replicas of Constructions by Naum Gabo: A Statement by the Copyright Holders [Réplicas de construcciones de Naum Gabo: Un extracto de los derechos de autor]. *Tate Paper*, 8. Recuperado de <http://www.tate.org.uk/research/publications/tate-papers/08/replicas-of-constructions-by-naum-gabo-a-statement-by-the-copyright-holders>

Recursos electrónicos

Abella, B. (2012). *Tema 6: Investigación, catalogación y documentación aplicada al museo. El museo como centro de investigación. Sistemas de documentación y catalogación. Criterios internacionales para la documentación en museos. Movimiento de colecciones. Museología y Museografía*. Recuperado de <https://gradohistoriaarteuned.files.wordpress.com/2013/10/tema-6-beatriz.pdf>

Bitellia, G., Girellia, V. A., Marzialib, M. & Zanuttaa, A. (2007). *Use of historical images for the documentation and the metrical study of cultural heritage by means of digital photogrammetric techniques* [Uso de imágenes históricas para la documentación y el estudio métrico del patrimonio cultural mediante técnicas fotogramétricas digitales]. Recuperado de www.isprs.org/proceedings/XXXVI/5-C53/papers/FP028.pdf

Brightom. (Sin fecha). *3D-Coform* [3D-Coform]. Recuperado de <https://www.brighton.ac.uk/research-and-enterprise/research/life-health-and-physical-sciences/research-groups/computing/3d-coform.aspx>

Bryce, E. (2015). *The British Museum uses 3D scanning to bring artefacts to life* [El Museo Británico usa el escaneo 3D para hacer que los artefactos cobren vida]. Recuperado de <http://www.wired.co.uk/article/reprinting-history>

Canal Patrimonio. (15 de octubre de 2015). Digitalizar para conocer y preservar el Patrimonio. [Entrada en blog]. *Canal Patrimonio*. Recuperado de <http://www.canalpatrimonio.com/digitalizar-para-conocer-preservar-el-patrimonio/>

Canal Patrimonio. (3 de mayo de 2016). Comienza el escaneo de la mayor tumba del Valle de los Reyes. [Entrada en blog]. *Canal Patrimonio*. Recuperado de <http://www.canalpatrimonio.com/comienza-el-escaneo-de-la-mayor-tumba-del-valle-de-los-reyes/>

Carta de Venecia. (1964). Recuperado de http://www.unesco.org/culture/natlaws/media/pdf/guatemala/guatemala_carta_venecia_1964_spa_orof.pdf

Catalhoyuk. (Sin fecha). *The Project* [El proyecto]. Recuperado de <http://www.catalhoyuk.com/project>

Cdbp. (Sin fecha). *Centro de Documentación de Bienes Patrimoniales. El Patrimonio de Chile. Historia del centro de documentación de bienes patrimoniales*. Recuperado de <http://www.cdbp.cl/652/w3-propertyvalue-43870.html>

Cendrero. (29 de agosto de 2010). La historia del Hombre de Piltdown, el falso eslabón perdido. [Entrada en blog]. *El busto de Palas*. Recuperado de <http://elbustodepalas.blogspot.com.es/2010/08/la-historia-del-hombre-de-piltdown-el.html>

Cidoc. (Sin fecha). *Documentación. Comité internacional para la documentación*. Recuperado de <http://icom.museum/los-comites/comites-internacionales/comites-internacionales/comite-internacional-para-la-documentacion/L/1/>

Cvida. (Sin fecha). *Mejor aprovechamiento de las tecnologías de representación tridimensional del patrimonio cultural*. Recuperado de http://www.cvida.com/index.php?option=com_content&view=article&id=8416:mejor-aprovechamiento-de-las-tecnologias-de-representacion-tridimensional-del-patrimonio-cultural&catid=68:boletines-turismo-y-ocio

De Jorge, J. (13 de diciembre de 2012). El fraude del hombre de Piltdown, cien años de un misterio sin resolver”. *ABC.es*. Recuperado de <http://www.abc.es/ciencia/20121213/abci-hombre-piltdown-cien-anos-201212122007.html>

Factum Arte. (Sin fecha a). *El claustro románico de la Catedral de Tudela*. Recuperado de <http://www.factum-arte.com/pag/273/El-claustro-romanico-de-la-Catedral-de-Tudela>

Factum Arte. (Sin fecha b). *Escaneando el Gough Map y el Mapa Selden en la Bodleian Library, Oxford*. Recuperado de <http://www.factum-arte.com/pag/660/Escaneando-el-Gough-Map--br--y-el-Mapa-Selden-en-la--i--Bodleian-Library--i---Oxford>

Factum Arte. (Sin fecha c). *Escaneando un cuadro de Bellini en la National Gallery de Londres*. Recuperado de <http://www.factum-arte.com/pag/633/Escaneando-un-cuadro-de-Bellini---en-la--i--National-Gallery--i--de-Londres>

Factum Arte. (Sin fecha d). *Iniciativa para la Preservación de la Necrópolis Tebana*. Recuperado de <http://www.factum-arte.com/pag/794/Iniciativa-para-la-Preservacion-de-la-Necropolis-Tebana>.

Factum Arte. (Sin fecha e). *Proyecto Basilica di San Petronio*. Recuperado de <http://www.factum-arte.com/pag/675/Proyecto-Basilica-di-San-Petronio>

Glenler, H. (Sin fecha). *GeoITconsulsten* [GeoITconsulsten]. Recuperado de <http://geoitkonsulsten.se/specialistomraden/intrasis/>

Google Arts & Culture. (2016). *Eternal Sites* [Sitios eternos]. Recuperado de <https://www.google.com/culturalinstitute/beta/exhibit/IQLCquWsLmG7Ig>

Institute of Computer Science II. (Sin fecha). *3D-COFORM* [3D-COFORM]. Recuperado de <http://cg.cs.uni-bonn.de/en/projects/3d-coform-tools-and-expertise-for-3d-collection-formation/>

Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico. (Sin fecha). *Patrimonio Cultural. Documentación gráfica del Patrimonio Cultural*. Recuperado de <http://www.iaph.es/web/canales/patrimonio-cultural/doc-grafica.html>

Levoy, M. (Sin fecha). *A 3D computer model of the head of Michelangelo's David* [Un modelo de ordenador 3D de la cabeza del David de Miguel Ángel]. Recuperado de <https://graphics.stanford.edu/projects/mich/head-of-david/head-of-david.html#The 0.29mm model>

Levoy, M. (1999). *The Digital Michelangelo Project: Creating a 3D archive of his sculptures using laser scanning* [The Digital Michelangelo Project: Creación de un archivo 3D de sus esculturas utilizando escaneo láser]. Recuperado de www.cs.cmu.edu/~seitz/course/SIGG99/papers/levoy-abs.pdf

Levoy, M. (1997). *The Digital Michelangelo Project* [The Digital Michelangelo Project]. Recuperado de <http://graphics.stanford.edu/projects/mich/>

Lund University. (2015). *The key to Uppåkra: Digitizing a unique archeological cultural heritage, Project Research* [La clave de Uppåkra: Digitalizar un patrimonio cultural arqueológico único, Project Research]. Recuperado de [http://portal.research.lu.se/portal/en/projects/the-key-to-uppaakra-digitizing-a-unique-archeological-cultural-heritage\(b5a27f10-0744-4aa7-8fc5-ea5976d01473\).html](http://portal.research.lu.se/portal/en/projects/the-key-to-uppaakra-digitizing-a-unique-archeological-cultural-heritage(b5a27f10-0744-4aa7-8fc5-ea5976d01473).html)

Mecd. (Sin fecha a). *Documentación de colecciones en los Museos*. Recuperado de <http://www.mecd.gob.es/cultura-mecd/areas-cultura/museos/funciones-de-los-museos/documentacion/documentacion-de-colecciones.html>

Mecd. (Sin fecha b). *Introducción a la documentación en los Museos Departamento técnico de documentación*. Recuperado de <http://www.mecd.gob.es/mecd/cultura-mecd/areas-cultura/museos/funciones-de-los-museos/documentacion/introduccion.html>

Ministerio de Cultura. (Sin fecha). *Domus*. Recuperado de <http://www.mecd.gob.es/cultura-mecd/dms/mecd/cultura-mecd/areas->

cultura/museos/funciones-de-los-museos/documentacion/documentacion-de-colecciones/Domus_funcionalidades.pdf

Morphosource.org. (Sin fecha). *Getting Started* [Empezando]. Recuperado de <http://morphosource.org/>

National Geographic. (2012). *El hombre de Piltdown, uno de los mayores fraudes científicos, Historia, actualidad.* Recuperado de http://www.nationalgeographic.com.es/historia/actualidad/el-hombre-de-piltdown-uno-de-los-mayores-fraudes-cientificos_6879/3

Nespos. (Sin fecha). *Home* [Inicio]. Recuperado de <https://www.nespos.org/display/openspace/Home>

Pereira, J. (2012a). *Xestion da cor na documentacion do patrimonio* [Gestión del color en la documentación del patrimonio]. Recuperado de <https://www.slideshare.net/jpereiranet/xestion-da-cor-documentacion-patrimonio>

Pereira, J. (10 de noviembre de 2012b). La documentación gráfica del patrimonio cultural: de la brecha digital al alarde tecnológico. [Entrada de blog]. *Digital Heritage*. Recuperado de <http://www.jpereira.net/apuntes-breves/la-documentacion-grafica-del-patrimonio-cultural-de-la-brecha-digital-al-alarde-tecnologico>

Pereiro, X. M. (1 de diciembre de 1992). Devuelta a España 'La aurora', de Rubens, robada de La Coruña en 1.985. La tabla viajó ayer en avión desde Washington vigilada por la Policía Judicial. *El País.com*. Recuperado de http://elpais.com/diario/1992/12/01/cultura/723164402_850215.html

Penn Museum. (Sin fecha). *Welcome* [Bienvenido]. Recuperado de <https://www.penn.museum/sites/orsa/Welcome.html>

Principios de Sevilla. (2011). *Fórum Internacional de Arqueología Virtual*. Recuperado de <http://smartheritage.com/wp-content/uploads/2016/06/PRINCIPIOS-DE-SEVILLA.pdf>

Rae. (Sin fecha). *Infografía*. Recuperado de <http://dle.rae.es/srv/search?m=30&w=infograf%C3%ADa>

Vídeos

Factum Arte. [Factum Arte]. (11 de julio de 2013). *San Petronio, Felsinae Thesaurus*. [Archivo de Vídeo]. Recuperado de <https://vimeo.com/70103368>

University of Oxford. (3 de septiembre de 2014). *Conserving by copying: 3D Printing Tutankhamun's Tomb* [Conservando copiando: Impresión en 3D de la Tumba de Tutankamón]. [Archivo de Vídeo]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=78yHqP1lazA&noredirect=1>

Referencias capítulo 5

Libros, artículos de revistas y conferencias

Ángeles, M. (2010). Pintura y escultura digital 3d con ZBrush aplicada a la Arqueología. En Grande A., López-Mencheró V. M., Hernández-Barahona, A. (Eds.) *Actas Arqueológica 2.0 2010, II Congreso Internacional de arqueología e informática gráfica, patrimonio e innovación, arqueológica 2.0* (pp. 311-314). Sevilla, España: Sociedad Española de Arqueología Virtual.

Espinel, J. C. (2016). *Procesos digitales y sistemas de prototipado rápido aditivos aplicados a la creación escultórica de pequeño formato y relieves* (Tesis Doctoral). Universidad Complutense de Madrid, Madrid.

González-Varas, I. (2008). *Conservación de Bienes Culturales. Teoría, historia, principios y normas*. 6ª Edición. Madrid, España: Ediciones Cátedra, Grupo Anaya.

Grande, A. y Rodríguez Hidalgo, J. M. (2010). Itálica Futura: Documentación, Preservación e Interpretación Digital de la ciudad romana. En Grande A., López-Mencheró V. M., Hernández-Barahona, A. (Eds.) *Actas Arqueológica 2.0 2010, II Congreso Internacional de arqueología e informática gráfica, patrimonio e innovación, arqueológica 2.0* (pp. 107-118). Sevilla, España: Sociedad Española de Arqueología Virtual.

Macarrón, A. M. y González Mozo, A. (2011). *La conservación y la restauración en el siglo XX*. 3ª Edición, Madrid, España: Tecnos.

Macarrón, A. M. (2013). *Historia de la conservación y la restauración. Desde la antigüedad hasta el siglo XX*. 3ª Edición, Madrid, España: Tecnos.

Riesco, A. (2017). *Métodos cuantitativos para la reconstrucción de la columna vertebral torácica en anatomía evolutiva humana* (Trabajo de Fin de Máster). Universidad Complutense de Madrid y Universidad de Alcalá, Madrid.

Scopigno, R. (2011). Sampled 3D models for Cultural Heritage: Which uses beyond visualization? [Ejemplos de modelos tridimensionales para el Patrimonio Cultural: ¿Qué usos más allá de la visualización?]. En Grande A., López-Mencheró V. M., Hernández-Barahona, A. (Eds.) *Actas Arqueológica 2.0 2011, III Congreso Internacional de arqueología e informática gráfica, Patrimonio e innovación, arqueológica 2.0* (pp.18-24). Sevilla, España: Sociedad Española de Arqueología Virtual.

Stanco, F. & Tanasi, D. (2011). Experiencing the Past: Computer Graphics in Archaeology [Experimentando el pasado: gráficos por computadora en arqueología]. In Gallo, G., La Rosa, V., Stanco, F. & Tanasi, D. (Eds.). *Digital imaging for cultural heritage*

preservation: analysis, restoration and reconstruction of ancient works. Florida, FL: CRC Press.

Tejerina, D., Esclapés, F. J., Pasíes, T. y Melchor J. M. (2011). La restauración virtual de piezas arqueológicas a partir de datos procedentes de escáner 3D: reconstrucción volumétrica de una jarrita islámica del Museo Arqueológico Municipal de Burriana (Castellón). En Grande A., López-Mencheró V. M., Hernández-Barahona, A. (Eds.) *Actas Arqueológica 2.0 2011, III Congreso Internacional de arqueología e informática gráfica, Patrimonio e innovación, arqueológica 2.0* (pp.242-245). Sevilla, España: Sociedad Española de Arqueología Virtual.

Libros, revistas y congresos online

Bazeta, F. y Rodríguez López, A. (2013). La anastilosis y el factor autenticidad. Una aplicación sobre bienes culturales ubicados en parajes naturales. En Junta de Castilla y León y Consejería de Cultura y Turismo (Eds.) *Actas VIII Congreso Internacional AR&PA 2012, Innovación en el Patrimonio* (pp.268-280). Recuperado de <http://www.jcyl.es/web/jcyl/binarios/613/71/actasAR&PA2012.pdf>

Colmenero, A. y Rodríguez Cao, C. (2012). Anastilosis Virtual de A Domus Do Mitreo De Lvcvs Avgvsti. *Virtual Archaeology Review*, 3(5), 104-108. doi: <https://doi.org/10.4995/var.2012.4536>

Coon, C., Pretzel, B., Lomax, T. & Strlič, M. (2016). Preserving rapid prototypes: a review. *Heritage Science*, 4:40. doi: 10.1186/s40494-016-0097-y

Cruzalta, J. C. (2013). La Reconstrucción virtual del Templo y el Exconvento de San Francisco de Pachuca, Hidalgo. *Arkeopáticos*, Textos sobre Arqueología y Patrimonio, Año I, nº5, 35-53. Recuperado de https://www.academia.edu/6023250/La_Reconstrucci%C3%B3n_Virtual_del_Templo_y_

Exconveneto_de_San_Francisco_de_Pachuca_Hidalgo._En_Textos_ArKeop%C3%A1ticos_No._5

Escriva, F. y Madrid, J. A. (2010). El mundo virtual en la restauración. Aplicaciones virtuales para la conservación y restauración del patrimonio. *Arché*, Publicación del instituto universitario de restauración del patrimonio de la UPV, nº 4 y 5, 11-20. Recuperado de http://www.irp.webs.upv.es/documents/arche_article_122.pdf

Forte, M. (2014). Virtual reality, cyberarchaeology, teleimmersive archaeology [Realidad virtual, ciberarqueología, arqueología teleinmersiva]. In Redondino, F. & Campana, S. (Eds.), *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage. Theory and best practices* (pp. 115-129. British Archaeological Reports. Recuperado de https://www.academia.edu/5719952/3D_Modeling_in_Archaeology_and_Cultural_Heritage_Theory_and_Best_Practices?auto=download

Garofalo, V. (2015). In assenza di intervento. Rappresentazioni digitali di restauri virtuali [En ausencia de intervención. Representaciones digitales de restauraciones virtuales]. *DisegnareCon*, 9(14). Recuperado de <http://disegnarecon.univaq.it/ojs/index.php/disegnarecon/article/download/37/32>

Gómez Robles, L. y Quirosa, V. (2009). Nuevas tecnologías para difundir el Patrimonio Cultural: las reconstrucciones virtuales en España. *E-rph. Revista electrónica de Patrimonio Histórico*, nº 4. Recuperado de <http://revistaseug.ugr.es/index.php/erph/article/view/3357/3369>

Gómez Robles, L. Quirosa, V. y Fernández Ruiz, J. A. (2009). El patrimonio “intangible”. Infografía para preservar la memoria del pasado. *Arqueoweb, Revista sobre arqueología en internet*, 12. Recuperado de pendientedemigracion.ucm.es/info/arqueoweb/pdf/12/robles.pdf

González Moreno-Navarro, A. (2007). Restaurar es reconstruir. A propósito del nuevo monasterio de Sant Llorenç de Guardiola de Berguedà (BARCELONA). *E-rph. Revista electrónica de patrimonio histórico*, nº 1. Recuperado de <http://www.revistadepatrimonio.es/revistas/numero1/intervencion/estudios/articulo3.php>

Grande A. y Rodríguez Hidalgo, J. M. (2011). Itálica Futura: Documentación, Preservación e Interpretación Digital de la ciudad romana. *Virtual Archaeology Review*, 2(4), 77-87. Recuperado de <https://polipapers.upv.es/index.php/var/article/view/4559/4693>

Kemp, D. (1995). Personal computer-based three-dimensional reconstruction modeling of standing buildings [Modelado de reconstrucción tridimensional basado en computadora personal de edificios permanentes]. *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, N° 598, 249–254. Oxford: BAR International Series. Recuperado de https://bibliographie.uni-tuebingen.de/xmlui/bitstream/handle/10900/61924/37_Kemp_CAA_1993.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Laumain X., López Sabater, A., Rios, J. y Huerta, C. (2012). Sistemas de bajo coste en levantamiento y restitución virtual. El caso del Palauet Nolla de Meliana. *Virtual Archaeology Review*, 3(5), 68-72. doi: <https://doi.org/10.4995/var.2012.4526>

Lautenschlager, S., Witmer, L. M., Altangerel, P., Zanno, L. E. & Rayfield, E. J. (2014). Cranial anatomy of *Erlikosaurus andrewsi* (Dinosauria, Therizinosauria): new insights based on digital reconstruction. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 34 (6), 1263-1291. doi: 10.1080/02724634.2014.874529

Lautenschlager, S., (2016). Reconstructing the past: methods and techniques for the digital restoration of fossils. *Royal Society Open Science*, 3. doi: 10.1098/rsos.160342

Lebrero, J. (2003). Patrimonio y Virtualidad en Creación en Internet: los nuevos museos de arte en PH. *Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, Año nº 11, N° 46, 61-67. Recuperado de <http://www.iaph.es/revistaph/index.php/revistaph/article/view/1630/1630#.WHyYuNLhBdg>

Maqueda, R., Luque, M., Andreu, J. y Romero, L. (2015). Princeps Resurgens: investigación arqueológica y documentación fotogramétrica en el estudio de una estatua romana thoracata de Los Bañales (Uncastillo, Zaragoza). *Virtual Archaeology Review*, 6(13), 65-71. doi:10.4995/var.2015.4379

Martín, P., Llamas, J. M., Gómez García-Bermejo J., Zalama, E. y Castillo, J. (2010). Restauración y Simulación Virtual de Policromías en Sta. Mª. de Mave: Un Ejemplo de Nuevas Formas de Explotación del Patrimonio. *ARPA*. Bienal de la restauración y Gestión del Patrimonio 2010. Recuperado de http://www.romaniconorte.org/docftp/fi15435Publicacion_ARPA_2010.pdf

Martín, P., Llamas, J. M. y Perán, J. R. (2013). Recuperación Virtual de Policromías Mediante Modelos 3D. En Junta de Castilla y León y Consejería de Cultura y Turismo (Eds.) *Actas VIII Congreso Internacional AR&PA 2012, Innovación en el Patrimonio* (pp.79-88). Recuperado de <http://www.jcyl.es/web/jcyl/binarios/613/71/actasAR&PA2012.pdf?>

Peral, R., Sagasti, D. & Sillaurren, S. (2005). Virtual Restoration of Cultural Heritage Through Real-Time 3D Models Projection [Restauración virtual del patrimonio cultural a través de la proyección de modelos 3D en tiempo real]. In M. Mudge, N. Ryan, R. Scopigno (Eds.) *The 6th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST*. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/03ee/e87b9e6e7a0047c0f57f6554cedacd9e5a60.pdf>

Pinto, F., Guerrero, J. M. y Angulo, R. (2012). Anastilosis de la Scaenae Frons del Teatro Romano de Itálica. *Virtual Archaeology Review*, 3(6), 59-63. doi: <https://doi.org/10.4995/var.2012.4442>

Riccardelli, C., Soultanian, J., Morris, M., Becker, L., Wheeler, G. & Street, R. (2014). The Treatment of Tullio Lombardo's Adam: A New Approach to the Conservation of Monumental Marble Sculpture [El tratamiento del Adán de Tullio Lombardo: un nuevo enfoque para la conservación de la escultura monumental de mármol]. *Metropolitan Museum Journal*, nº 49, 49-116. New York, NY: The Metropolitan Museum. doi: <https://doi.org/10.1086/680027>

Rodríguez Silgo, A. (2015). Digitalización y virtualización del patrimonio cultural. Hacia un nuevo horizonte en la conservación-restauración. En Fundación Telefónica (Ed.), *Telos*, Cuadernos de Comunicación e Innovación, 102, 1-8. Recuperado de

<https://telos.fundaciontelefonica.com/url-direct/pdf-generator?tipoContenido=articuloTelos&idContenido=2015110316500003&idioma=es>

Romero L., Andreu, J. y Galbadón, M. M. (2014). Un thoracatus imperial en Los Bañales (Uncastillo, Zaragoza). *Zephyrus*, 73, 197-211. Recuperado de revistas.usal.es/index.php/0514-7336/article/download/.../12221

Scopigno, R. (2012). Sampled 3D models for Cultural Heritage: Which uses beyond visualization? [Ejemplos de modelos tridimensionales para el Patrimonio Cultural: ¿Qué usos más allá de la visualización?] *Virtual Archaeology Review*, 3(5), 109-115. doi: <https://doi.org/10.4995/var.2012.4537>

Stanco, F., Tanasi, D., Allegra, D., Milotta, F. L. M., Lamagna, G. & Monterosso, G. (2017). Virtual anastylosis of Greek sculpture as museum policy for public outreach and cognitive accessibility [Anastylosis virtual de escultura griega como política de museo para divulgación pública y accesibilidad cognitive]. *Journal of Electronic Imaging*, 26(1), 011025-1- 011025-12, 2017. Recuperado de <http://electronicimaging.spiedigitallibrary.org/>

Stanić, M. (2010). *Structure, surface and permanence properties of three dimensional printing materials* [Estructura, superficie y permanencia de las propiedades de los materiales de impresión 3D] (Tesis Doctoral). University of Zagreb, Croacia. Recuperado de <http://eprints.grf.unizg.hr/1432/1/Doktorski%20rad%20Stanic%20Maja.pdf>

Sundstedt, V., Chalmers, A. & Martinez, P. (2004). High fidelity reconstruction of the ancient Egyptian temple of Kalabsha [Reconstrucción en alta fidelidad del antiguo templo egipcio de Kalabsha]. Conference: *Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Graphics, Virtual Reality, Visualisation and Interaction in Africa*, Afrigraph 2004, Stellenbosch, South Africa, November 3-5. doi: 10.1145/1029949.1029970

Syson, L. & Cafá, V. (2014). Adam by Tullio Lombardo. *Metropolitan Museum Journal*, nº 49, 8-31. New York, NY: The Metropolitan Museum. doi: <https://doi.org/10.1086/680047>

Tsiafaki, D., Koutsoudis, A., Arnaoutoglou, F. & Michailidou, N. (2016). Virtual reassembly and completion of a fragmentary drinking vessel [Reensamblaje virtual y finalización de un recipiente para beber fragmentario]. *Virtual Archaeology Review*, 7(15), 67-76. doi: <http://dx.doi.org/10.4995/var.2016.5910>

Recursos electrónicos

Ageo. (3 de julio de 2014). Anastilosis virtual, un avance para la arqueología. [Entrada en blog]. *Ageo 3D Tech*. Recuperado de <http://www.ageo.es/index.php/noticias/blog/item/30-anastilosis-virtual-un-avance-para-la-arqueologia>

Alcalá, L. (7 de noviembre de 2014). Restauradores digitales. *El Mundo.es*. Recuperado de <http://www.elmundo.es/blogs/elmundo/blogosaurio/2014/11/07/restauradores-digitales.html>

Amira-Avizo Software. (Sin fecha). *Amira-Avizo Software*. Recuperado de <https://www.fei.com/software/amira-avizo/>

Arturo, A. (Sin fecha). Historia. [Entrada en blog]. *El Arte Digital*. Recuperado de <https://elartedigital.wordpress.com/historia/>

Behzad, N. y Qarizadah, D. (13 de marzo, 2015). El hombre que ayudó a destruir los Budas de Bamiyan. *BBC.com*. Recuperado de http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/03/150312_cultura_hombre_destruye_budas_bamiyan_egn

Building Smart. (Sin fecha). *¿Qué es BIM?* Recuperado de <https://www.buildingsmart.es/bim/>

Cerámica Tres Piedras. (Sin fecha). *Cuerda seca*. Recuperado de <http://www.ceramicatrespiedras.com/cursos/tecnicas/cuerda-seca/>

Principios de Sevilla. (2011). *Fórum Internacional de Arqueología Virtual*. Recuperado de <http://smartheritage.com/wp-content/uploads/2016/06/PRINCIPIOS-DE-SEVILLA.pdf>

Cocco, P. (2011). *La Madonna di Pietranico: genesi di un restauro complesso* [La Madonna di Pietranico: génesis de una restauración compleja]. Recuperado de http://www.beniculturali.it/mibac/export/MiBAC/sito-MiBAC/Contenuti/MibacUnif/Comunicati/visualizza_asset.html_1323294850.html

Cosch. (Sin fecha). *Welcome to the homepage of COST-Action TD 1201*. [Bienvenido a la página de inicio de COST-Action TD 1201]. Recuperado de <http://cosch.info/>

Cuéllar, J. (3 de marzo, 2015). El 'San Juanito', único Miguel Ángel en España, muerto y resucitado en el Prado. *RTVE*. Recuperado de <http://www.rtve.es/noticias/20150330/san-juanito-unico-miguel-angel-espana-muerto-resucitado-prado/1123758.shtml>

Dedalo Cultura. (Sin fecha). *Anastilosis*. Recuperado de <http://www.dedalocultura.com/laalmena/anastilosis/>

Efe. (15 de junio, 2015). *Los budas destruidos por los talibán hace 14 años reviven en 3D*. ElMundo.es. Recuperado de <http://www.elmundo.es/cultura/2015/06/15/557f001aca4741607b8b45a6.html>

Factum Arte. (Sin fecha a). *Anish Kapoor*. Recuperado de <http://www.factum-arte.com/ind/56/Anish-Kapoor>

Factum Arte. (Sin fecha b). *Greyman cries Shaman Dies Billowing Smoke Beauty Evoked*. Recuperado de <http://www.factum-arte.com/pag/373/Greyman-cries-Shaman-Dies-Billowing-Smoke-Beauty-Evoked>

Fundación Telefónica. (2017). *3D Imprimir el mundo*. Recuperado de https://espacio.fundaciontelefonica.com/wp-content/uploads/2017/02/guia_practica_3d.pdf

Guiraud, M. (3 de diciembre de 2014). Arte 3D por Mariano Giraud. [Entrada de blog]. *Distrito arte*. Recuperado de <http://www.distritoarte.com/en-3d-por-mariano-giraud/>

Icom. (2008). *Terminología para definir la conservación del patrimonio cultural tangible*. Recuperado de http://ge-iic.com/files/Cartasydocumentos/2008_Terminologia_ICOM.pdf

Imprimalia 3D. (2017). *Obras de arte impresas en 3D para ensayar métodos de restauración*. Recuperado de <http://imprimalia3d.com/noticias/2016/12/22/008544/obras-arte-impresas-3d-ensayar-m-todos-restauraci-n>

Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico. (2011). *Proyecto de documentación gráfica del patrimonio mediante nuevos formatos de modelado e imagen*. Recuperado de http://www.iaph.es/export/sites/default/Webmaster/20110610base/resources/documentos/Proyecto_modelado_imagen.pdf

Kanh, S. (Sin fecha). *Sophie Kanh*. Recuperado de <https://www.sophiekahn.net>

Museo del Prado. (2015). *El San Juanito recuperado, Una escultura de Miguel Ángel en España*. Recuperado de <https://www.museodelprado.es/actualidad/noticia/el-san-juanito-recuperado-una-escultura-de-miguel/4f455c1e-a385-45e3-ba26-ec9a58d8aec9>

Nanorestart. (2015). *Home* [Inicio]. Recuperado de <http://www.nanorestart.eu/>

Vídeos

Bevilacqua, M. [Michele Bevilacqua]. (16 de noviembre de 2011). *Madonna di Pietranico* [Madonna de Pietranico]. [Archivo de Vídeo]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=2dquqRwkpqk>

Fundación Barrie. [FundaciónBarrie]. (20 de febrero de 2013). *Pórtico de la Gloria: pasado, presente y futuro*. [Archivo de Vídeo]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=Cg6bvuW50Q4>

Rtve. [Rtve]. (30 de marzo de 2015). *El San Juanito, único de Miguel Ángel en España, muerto y resucitado*. [Archivo de vídeo]. Recuperado de <http://www.rtve.es/alacarta/videos/telediario/td2-san-juanito-300315/3069556/>

The Metropolitan Museum of Art. [The Metropolitan Museum of Art]. (2014). *After the Fall: The Conservation of Tullio Lombardo's "Adam"* [Después de la caída: La conservación del "Adam" de Tullio Lombardo]. [Archivo de vídeo]. Recuperado de <http://www.metmuseum.org/exhibitions/listings/2014/tullio-lombardo-adam>

Videos Los Bañales. [Videos Los Bañales]. (7 de julio de 2014). *Una estatua imperial romana en Los Bañales de Uncastillo (Canal UNED y La 2 de TVE, Julio de 2014)*. [Archivo de vídeo]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=8YESqq9DgrY&feature=youtu.be>

Referencias capítulo 6

Libros, artículos de revistas y conferencias

Ávila, A. (2003). *El arte y sus museos*. Barcelona, España: Ediciones del Serbal.

Berjano, R. y Fernández Colón, P. (2003). El valor documental de las copias. *Pátina*, 12, 85-92.

De la Torre, T. (2003). Digitalizar el pasado: Facsímiles para la conservación. *Restauración & Rehabilitación*, 73, 38-43.

Estella, M. (2001). Los historicismos y sus consecuencias para el arte del s. XX en el campo de la escultura. Copias, réplicas y falsos. *El arte español del s. XX. Su perspectiva al final del milenio* (pp. 125-144). Madrid, España: Biblioteca de Historia del arte.

Factum Arte. (2009). *Factum Arte's work in the Tombs of Tutankhamun, Nefertari and Seti I*. Madrid, España: Factum Arte.

Herrero-Cortell, M. A. (2016). Arsgeminis pro ars. Las copias y reproducciones patrimoniales: usos, tendencias, percepción, y repercusión social. *RdM, Revista de Museología: Publicación científica al servicio de la comunidad museológica*, 67, 11-20.

Jones, M. (1992). Do fakes matter? [¿Las falsificaciones importan?]. In Jone, M. & British Museum (Eds.). *Why fakes matter: Essays on Problems of Authenticity* (pp.7-12). London, Great Britain: Trustees of the British Museum by British Museum Press.

Krauss, R. (1996). *La originalidad de la Vanguardia y otros mitos modernos* (Gómez Cedillo, A.). 1ª Edición, 2ª reimpresión. Madrid, España: Alianza.

Lowe, A. (2004). Producción del facsímil. En Abt, T., Pérez Die, M. C. y Lowe, A. (Eds.). *La Tumba de Tutmosis III: Las Horas Oscuras del Sol* (pp.135-142). Madrid, España: Fundación Banco Santander.

Lowenthal, D. (1992). Authenticity? The dogma of self-delusion [¿Autenticidad? El dogma del autoengaño]. In Jone, M. & British Museum (Eds.). *Why fakes matter: Essays on Problems of Authenticity* (pp.184-192). London, Great Britain: Trustees of the British Museum by British Museum Press.

Macarrón, A. M. y González Mozo, A. (2011). *La conservación y la restauración en el siglo XX*. 3ª Edición, Madrid, España: Tecnos.

- Macarrón, A. M. (2013). *Historia de la conservación y la restauración. Desde la antigüedad hasta el siglo XX*. 3ª Edición, Madrid, España: Tecnos.
- Matía, M. (2009). Reproductibilidad. En Tres Cantos (Ed.), *Procedimientos y materiales en la obra escultórica* (pp. 99-132). Madrid. España: Akal.
- Morón, M. F. (1998). Originales y copias: La ilusión en la creación. *Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, 24, 117-121.
- Negrete, A. (2003). Las reproducciones de esculturas. Del mármol a los materiales imitadores. En Universidad de Cantabria (Ed.) *Actas de los XIII cursos monográficos sobre patrimonio histórico (Reinosa julio- agosto 2002)* (pp.77-88). Reinosa (Santander), España.
- Pereira, C. (1999a). Facsímiles de objetos de arte tridimensional 1º Parte: Moldeo. *Restauración & Rehabilitación*, 25, 66-71.
- Pereira, C. (1999b). Facsímiles de objetos de arte tridimensional 2º Parte: Vaciado. *Restauración & Rehabilitación*, 26, 66-71.
- Rosende, S. y Andrés, J. C. (2003). Clonar el patrimonio histórico. Creación de una réplica. Aplicación de nuevas tecnologías en conservación. *Pátina*, 12, 2003, 23-38.
- Santos, S. (2017). La realización de reproducciones artísticas como medida de conservación preventiva en los museos. *Revista de Museología: Revista de la Asociación Española de Museólogos*, Museo de América, 68, 112-126.
- Sauras, J. (2003). *La escultura y el oficio de escultor*. Barcelona, España: Ediciones del Serbal.
- Walter, B. (2010). La obra de arte en la época de su reproducción mecánica (Wolfgang, E.). Madrid, España: Casimiro Libros.

Libros, revistas y congresos online

Bazeta, F. y Rodríguez López, A. (2013). La anastilosis y el factor autenticidad. Una aplicación sobre bienes culturales ubicados en parajes naturales. En Junta de Castilla y León y Consejería de Cultura y Turismo (Eds.). *Actas VIII Congreso Internacional AR&PA 2012* (pp.268-280). Recuperado de <http://www.jcyl.es/web/jcyl/binarios/613/71/actasAR&PA2012.pdf>

Barassi, S. (2007). The Modern Cult of Replicas: A Rieglian Analysis of Values in Replication [El culto moderno de las réplicas: Un análisis Riegliano de los valores en la replicación]. *Tate Paper*, No. 8. Recuperado de <http://www.tate.org.uk/research/publications/tate-papers/08/the-modern-cult-of-replicas-a-rieglian-analysis-of-values-in-replication>

Beerens, L. (2007). Nothing but the Real Thing: Considerations on Copies, Remakes and Replicas in Modern Art [Nada más que lo real: Consideraciones sobre copias, remakes y réplicas en el arte moderno]. *Tate Paper*, No. 8. Recuperado de <http://www.tate.org.uk/research/publications/tate-papers/08/nothing-but-the-real-thing-considerations-on-copies-remakes-and-replicas-in-modern-art>

Berndes, C. (2007). Replicas and Reconstructions in Twentieth-Century Art [Réplicas y reconstrucciones en el arte del siglo XX]. *Tate Paper*, No. 8. Recuperado de <http://www.tate.org.uk/research/publications/tate-papers/08/replicas-and-reconstructions-in-twentieth-century-art>

Byrnes, A. (2013). Replicating the tomb of Tutankhamun. Conservation and sustainable tourism in the Valley of the Kings [Replicando la tumba de Tutankamón. Conservación y turismo sostenible en el Valle de los Reyes]. *Revista electrónica Egyptological*. Edición nº 8. Recuperado de <http://egyptological.com/2013/04/18/replicating-the-tomb-of-tutankhamun-conservation-and-sustainable-tourism-in-the-valley-of-the-kings-11253>

Cooper, H. (2007). Thoughts on Thoughts on Replication [Pensamientos sobre los pensamientos sobre la replicación]. *Tate Paper*, No. 8. Recuperado de <http://www.tate.org.uk/research/publications/tate-papers/08/thoughts-on-thoughts-on-replication>

Curtis, P. (2007). Replication: Then and Now [Replicación: entonces y ahora]. *Tate Paper*, No. 8. Recuperado de <http://www.tate.org.uk/research/publications/tate-papers/08/replication-then-and-now>

Fatás, P. (2009). La cueva de Altamira y su museo: un caso extremo en la relación entre turismo y patrimonio. En Domínguez Arranz (Ed.), *El patrimonio arqueológico a debate: su valor cultural y económico* (pp. 185-194). Huesca, España: Gobierno de Aragón. Recuperado de https://www.academia.edu/11376432/La_cueva_de_Altamira_y_su_museo_un_caso_extremo_en_la_relaci%C3%B3n_entre_turismo_y_patrimonio

González Moreno-Navarro, A. (2007). Restaurar es reconstruir. A propósito del nuevo monasterio de Sant Llorenç de Guardiola de Berguedà (BARCELONA). *e-rph. Revista electrónica de patrimonio histórico*, nº 1. Recuperado de <http://www.revistadepatrimonio.es/revistas/numero1/intervencion/estudios/articulo3.php>

Heuman, J. & Morgan, L. (2007). Tate Sculpture Replica Project [Tate Sculpture Replica Project]. *Tate Paper*, No. 8. Recuperado de <http://www.tate.org.uk/research/publications/tate-papers/08/tate-sculpture-replica-project>

Madarieta, A. (2013). Santimamiñe y Bizkaikoa. Un binomio de éxito. En Junta de Castilla y León y Consejería de Cultura y Turismo (Eds.). *Actas VIII Congreso Internacional AR&PA 2012* (pp.329-339). Recuperado de <http://www.jcyl.es/web/jcyl/binarios/613/71/actasAR&PA2012.pdf>

Lasheras, J. A. (2004). La reproducción facsímil de Altamira. En Asociación Cultural Tajamar (Ed.) *Litoral Atlántico* (pp.21-23). Recuperado de http://museodealtamira.mcu.es/web/docs/Litoral_Atlantico.pdf

Lasheras, J. A. (2008). La neocueva, un espacio singular del Museo de Altamira. Museos. En Lasheras, J. A. (Ed.) *La neocueva, un espacio singular del Museo de Altamira* (pp. 203-213). Espazo e discurso: IX Coloquio Galego de Museos, Lugo, 26, 27 e 28 de octubre de 2006, Lugo, España: Museo Provincial de Lugo. Recuperado de http://museodealtamira.mcu.es/web/docs/Espazo_e_Discurso.pdf

Lodder, C. (2007). Naum Gabo and the Quandaries of the Replica [Naum Gabo y los dilemas de la Réplica]. *Tate Papers*, No.8. Recuperado de <http://www.tate.org.uk/research/publications/tate-papers/08/naum-gabo-and-the-quandaries-of-the-replica>

Lye, H. (2007). Replicas of László Moholy-Nagy's Light Prop: Busch-Reisinger Museum and Harvard University Art Museumsen [Réplicas del Prop Light de László Moholy-Nagy: Museo Busch-Reisinger y Museo de Arte de la Universidad de Harvard]. *Tate Paper*, No. 8. Recuperado de <http://www.tate.org.uk/research/publications/tate-papers/08/replicas-of-laszlo-moholy-nagys-light-prop-busch-reisinger-museum-and-harvard-university-art-museums>

Mundy, J. (2007). Why/Why Not Replicate? [¿Por qué/ Por qué no replicar?]. *Tate Paper*, No. 8. Recuperado de <http://www.tate.org.uk/research/publications/tate-papers/08/whywhy-not-replicate>

Muzquiz, M. y Saura, P. (2002). El facsímil del techo de los bisontes de Altamira. En Lasheras, J. A. (Ed.). *Redescubrir Altamira* (pp. 219-242). Madrid, España: Turner ediciones. Recuperado de http://museodealtamira.mcu.es/web/docs/Redescubrir_facsimil.pdf

Rodríguez Silgo, A. (2015). Digitalización y virtualización del patrimonio cultural. Hacia un nuevo horizonte en la conservación-restauración. En Fundación Telefónica (Ed.), *Telos*, Cuadernos de Comunicación e Innovación, 102, 1-8. Recuperado de <https://telos.fundaciontelefonica.com/url-direct/pdf-generator?tipoContenido=articuloTelos&idContenido=2015110316500003&idioma=es>

Skowranek, H. (2007). Should We Reproduce the Beauty of Decay? A Museumsleben in the work of Dieter Roth [¿Deberíamos reproducir la belleza de la decadencia? Un Museumsleben en el trabajo de Dieter Roth]. *Tate Paper*, No. 8. Recuperado de <http://www.tate.org.uk/research/publications/tate-papers/08/should-we-reproduce-the-beauty-of-decay-a-museumsleben-in-the-work-of-dieter-roth>

Wilder, C. (1 de marzo de 2016). Swiping a Priceless Antiquity... With a Scanner and a 3-D Printer. [Golpeando una antigüedad inapreciable ... con un escáner y una impresora tridimensional]. *The New York Times.com*. Recuperado de <https://www.nytimes.com/2016/03/02/arts/design/other-nefertiti-3d-printer.html?mcubz=0>

Williams, N. & Williams G., (2007). Replicas of Constructions by Naum Gabo: A Statement by the Copyright Holders [Réplicas de construcciones de Naum Gabo: Un extracto de los derechos de autor]. *Tate Paper*, 8. Recuperado de <http://www.tate.org.uk/research/publications/tate-papers/08/replicas-of-constructions-by-naum-gabo-a-statement-by-the-copyright-holders>

Recursos electrónicos

20Minutos.es. (24 de febrero de 2016). Dos artistas copian el busto de Nefertiti y comparten en código libre su diseño en 3-D. *20Minutos.es*. Recuperado de <http://www.20minutos.es/noticia/2681086/0/nefertiti/copia-3d/codigo-libre/#xtor=AD-15&xts=467263>

3D Cad Portal. (2015). *El escaneo e impresión 3D permiten la primera reconstrucción de una nueva especie de Dinosaurio*. Recuperado de <http://www.3dcadportal.com/el-escaneo-e-impresion-3d-permiten-la-primera-reconstruccion-de-una-nueva-especie-de-dinosaurio.html>

Abc.es. (19 de abril de 2013). Roban cuatro cabezas de rinocerontes del Museo Nacional de Irlanda. *Abc.es*. Recuperado de <http://www.abc.es/natural-biodiversidad/20130419/abci-robo-cabezas-rinoceronte-museo-201304191209.html>

Afsp. (2016). *Sur le chantier de la réplique intégrale de la grotte de Lascaux* [En el sitio de la réplica completa de la cueva de Lascaux]. Recuperado de <http://www.afsp-perigord.fr/actualites/#620>

Afsp. (Sin fecha). *Making facimiles* [Fabricando facsimiles]. Recuperado de <http://www.afsp-perigord.fr/invention-e/>

Agencias. (16 de julio de 2001). El nuevo Complejo Altamira, listo para recibir a medio millón de visitantes al año. *El País.com*. Recuperado de http://cultura.elpais.com/cultura/2001/07/16/actualidad/995234402_850215.html

Alcalá, N. (2013). El Lissitzky y su potencial innovador. [Entrada en blog]. *Cultier*. Recuperado de <http://www.cultier.es/el-lissitzky-y-su-potencial-innovador/>

Arte Informando. (2015). *Sebastiano Barassi*. Recuperado de <http://www.arteinformado.com/guia/f/sebastiano-barassi-173787>

Bilboko Berreginen Museoa, Museo Reproducciones Bilbao. (Sin fecha a). *Fundación*. [Recuperado de <http://www.museoreproduccionesbilbao.org/es/el-museo/la-institucion/fundacion>

Bilboko Berreginen Museoa, Museo Reproducciones Bilbao. (Sin fecha b). *La Colección*. Recuperado de <http://www.museoreproduccionesbilbao.org/es/el-museo/la-coleccion>

Biografías y Vidas. (Sin fecha). *Walter Benjamin*. Recuperado de <http://www.biografiasyvidas.com/biografia/b/benjamin.htm>

Bone Clones. (2007). *Neanderthal Skeleton Articulated*. Recuperado de <https://boneclones.com/product/neanderthal-skeleton-articulated-SC-019-A>

British Museum. (Sin fecha). *Shop Online*. Recuperado de <http://www.britishmuseumshoponline.org>

Carantoña, A. (29 de julio de 2012). La réplica de la cueva de Lascaux recibe 250.000 visitas al año. *El Comercio.es*. Recuperado de <http://www.elcomercio.es/v/20120729/cultura/replica-cueva-lascaux-recibe-20120729.html>

Carrión, F. (9 de junio de 2016). Las tumbas de Nefertari y Seti I, una visita de lujo. *El Mundo.es*. Recuperado de <http://www.elmundo.es/ciencia/2016/06/09/57594370468aebcd438b458d.html>

Casa del Libro. (Sin fecha). *El culto moderno a los monumentos*. Recuperado de <http://www.casadellibro.com/libro-el-culto-moderno-a-los-monumentos/9788477740018/469234>

CCC. (Sin fecha). *The Chaos Computer Club* [El Club Kaos computer]. Recuperado de <https://www.ccc.de/en/>

Cueva de Santimamiñe. (Sin fecha). *Cueva de Santimamiñe*. Recuperado de <http://www.xn--santimamie-19a.com/la-cueva/>

Díaz, R. (2 de julio de 2013). Los ladrones de cuernos asaltan los museos de Europa. *El Confidencial.com*. Recuperado de http://www.elconfidencial.com/cultura/2013-07-02/los-ladrones-de-cuernos-asaltan-los-museos-de-europa_495355/

Diputación Foral de Bizkaia. (2008). *Santimamiñe, milaka urteko paisaia. Santimamiñe, un paisaje milenario*. Recuperado de <http://www.bizkaia.eus/Home2/Archivos/DPTO4/Noticias/Pdf/Santimami%C3%B1e.pdf>

Encyclopaedia Britannica. (Sin fecha). *Sir Austen Henry Layard, British Archaeologist* [Sir Austen Henry Layard, arqueólogo británico]. Recuperado de <https://global.britannica.com/biography/Austen-Henry-Layard>

Europa Press. (18 de julio de 2014). La réplica de la Dama de Elche, tres años más en el Museo Arqueológico. *El Mundo.es*. Recuperado de <http://www.elmundo.es/comunidad-valenciana/2014/07/18/53c909b0268e3e506b8b4583.html>

Europol. (2016). *Europol, about us* [Europol, acerca de nosotros]. Recuperado de <https://www.europol.europa.eu/content/page/about-us>

Factum Arte. (2003). *La dama de Elche*. Recuperado de http://factum-arte.com/publications_PDF/Dama_elche_spanish.pdf

Factum Arte. (Sin fecha a). *La reconstrucción del extremo oriental de la sala del trono de Aurnasirpal II*. Recuperado de <http://www.factum-arte.com/pag/296/-p-La-reconstruccion-del-extremo-oriental-del-la-sala-del-trono-de-Aurnasirpal-II--p->

Factum Arte. (Sin fecha b). *Polittico Griffoni, tecnología digital aplicada a la re-integración de un retablo diseminado*. Recuperado de <http://www.factum-arte.com/pag/668/Polittico-Griffoni--br---i-Tecnologia-digital-aplicada-a-la-re-integracion-de-un-retablo-diseminado---i>

Factum Arte. (Sin fecha c). *Un facsímil de las Bodas de Caná de Paolo Veronese*. Recupera <http://www.factum-arte.com/pag/295/-p-Facs-iacute-mil-de-em--Las-Bodas-de-Can-aacute---em--de-Paolo-Veronese--p->

Factum Foundation. (Sin fecha a). *Facsimile of Sala Bologna. Vatican city, 2011* [Facsímil de la Sala Bolonia. Ciudad del Vaticano. 2011]. Recuperado de <http://www.factumfoundation.org/pag/25/>

Factum Foundation. (Sin fecha b). *Major international initiative to safeguard the Theban Necropolis* [Gran iniciativa internacional para salvaguardar la Necrópolis de Tebas]. Recuperado de <http://www.factumfoundation.org/pag/206/Major-internationalinitiative-to-safeguard-the-Theban-Necropolis>

Factum Foundation. (Sin fecha c). *Making the facsimile* [Fabricando el facsímil]. Recuperado de <http://www.factumfoundation.org/pag/208/Making-the-Facsimile>

Factum Foundation. (Sin fecha d). *Mapping the Hereford Mappa Mundi* [Cartografía el Mapamundi de Hereford]. Recuperado de <http://www.factumfoundation.org/pag/202/Mapping-the-Hereford-Mappa-Mundi>

Factum Foundation. (Sin fecha e). *Recording the Tomb*. [Registrando la Tumba]. Recuperado de <http://www.factumfoundation.org/pag/207/-p-Recording-the-tomb--p->

Factum Foundation. (Sin fecha f). *The Theban Necropolis Preservation Initiative* [La iniciativa de preservación de la Necrópolis Tebana]. Recuperado de <http://www.factumfoundation.org/pag/238/Theban-Necropolis-Preservation-Initiative-Summary>

Factum Foundation. (Sin fecha g). Tutankhamun's South Wall. [Muro sur de Tutankamón]. Recuperado de <http://www.factumfoundation.org/pag/209/Tutankhamun-apos-s-South-Wall>

Fernandez Santos, E. (7 de marzo de 2014). Ante una gran copia, ¿quién añora un original? *El País.com*. Recuperado de http://sociedad.elpais.com/sociedad/2014/03/07/actualidad/1394222230_387695.html

Getty. (2013). *Conservation and Management of the Tomb of Tutankhamen* [Conservación y gestión de la tumba de Tutankhamen] Recuperado de http://www.getty.edu/conservation/our_projects/field_projects/tut/overview.html

Gondwana Studios. (2012). *Bienvenido a Gondwana Studios*. Recuperado de <http://www.gondwanastudios.com/es/index.html>

Hawass, Z. (2008). *Conservation of Egyptian Monuments: The SCA Program for Site Management* [Conservación de monumentos egipcios: el programa SCA para la gestión del sitio]. Recuperado de http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/newsletters/23_2/feature1.html

Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico. (Sin fecha). *El desafío del Giralddillo*. Recuperado de

http://www.iaph.es/export/sites/default/galerias/documentacion_migracion/Cuaderno/1253548658356_giraldillo_romanfernandez.pdf

Jacinto, A. (8 de enero de 2011). Cerrado por descanso eterno. *El país.com*. Recuperado de http://elpais.com/diario/2011/01/08/sociedad/1294441201_850215.html

Lafont, I. (27 de abril de 2009). La obra que perdió el Reina Sofía puede ser parte de una autopista. *El País.com*. Recuperado de http://elpais.com/diario/2009/04/27/cultura/1240783201_850215.html

Laxcaus. (Sin fecha a). *Facsimile represents the almost entire original cave, copied with Perigord Facsimile Workshop (AFSP) special techniques* [El facsímil representa la cueva original casi completa, copiada con las técnicas especiales del Perigord Facsimile Workshop (AFSP)]. Recuperado de <http://projet-lascaux.com/en/facsimile>

Laxcaus. (Sin fecha b). *International Exhibition* [Exhibición Internacional]. Recuperado de <http://www.lascaux-expo.fr/en/>

Laxcaus-Dordogne. (Sin fecha a). *Érase una vez a Montignac*. Recuperado de <http://www.lascaux-dordogne.com/es/erase-una-vez-montignac>

Laxcaus-Dordogne. (Sin fecha b). *La Cueva de Laxcaus*. Recuperado de <http://www.lascaux-dordogne.com/es/la-cueva-de-lascaux>

Mena, M. B. (Sin fecha). *Cuadernos de Italia, José del Castillo*. Recuperado de <https://www.museodelprado.es/aprende/enciclopedia/voz/cuadernos-de-italia-jose-del-castillo/c6a0a515-12ac-42f6-a116-e110379b8fa7%20>

The Griffith Institute. (2005). *Tutankhamun: Anatomy of an Excavation. The Howard Carter Archives. Photographs by Harry Burton* [Tutankamón: Anatomía de una excavación. Los archivos de Howard Carter. Fotografías de Harry Burton]. Recuperado de <http://www.griffith.ox.ac.uk/gri/carter/gallery/HomePage.html>.

Mapamundi. (Sin fecha). *Explore Hereford's famous Mappa Mundi & unique medieval treasures* [Explora el famoso Mappa Mundi de Hereford y tesoros medievales únicos]. Recuperado de <http://www.themappamundi.co.uk/index.php>

Milleker, E. J. (Sin fecha). *Metropolitan Museum of Art* [Metropolitan Museum of Art]. Recuperado de <http://www.plastercastcollection.org/de/database.php?d=lire&id=172>

Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. (2014). *El Patronato del Museo de Altamira aprueba la realización de visitas experimentales a la cueva*. Recuperado de http://museodealtamira.mcu.es/web/docs/Nota_de_Prensa_del_Ministerio_Enero_2014.pdf

Museo de Altamira. (2015). *Visita a la Cueva de Altamira*. Recuperado de <http://museodealtamira.mcu.es/PreparaLaVisita/visitaLaCueva.html>

Museo Arqueológico Nacional. (Sin fecha). *La Dama de Elche*. Recuperado de <http://www.man.es/man/coleccion/catalogo-cronologico/protohistoria/dama-elche.html#acesocatalogo>

Museo del Prado. (Sin fecha). *Restauración de Nerón y Séneca, de Eduardo Barrón*. Recuperado de <https://www.museodelprado.es/aprende/investigacion/estudios-y-restauraciones/recurso/restauracion-de-neron-y-seneca-de-eduardo-barron/8dca97e3-f96c-4c09-8d6b-76aecb06c229>

Museo Nacional de Ciencias Naturales. (Sin fecha). *Paleovertebrados*. Recuperado de http://www.mncn.csic.es/Menu/Coleccionesydocumentacion/Colecciones/Paleovertebrados/seccion=1204&idioma=es_ES.do

Museo Nacional y Centro de Investigación de Altamira. (2004). *25 Aniversario 1979 - 2004 Exposición temporal julio – diciembre 2004*. Recuperado de http://museodealtamira.mcu.es/web/docs/dossier_25.pdf

Museo Thyssen – Bornemizsa. (2009). *Biografía y obras, László Moholy-Nagy*. Recuperado de http://www.museothyssen.org/thyssen/ficha_artista/408

National Geographic España. (2013). *La piedra de Rosetta se descubrió hace 214 años*. Recuperado de http://www.nationalgeographic.com.es/articulo/historia/actualidad/8462/piedra_rosetta_descubrio_hace_214_anos.html

Nefertiti Hack. (Sin fecha). *Nefertiti Hack*. Recuperado de <http://nefertitihack.alloversky.com/>

Permuy, I. (2 de abril de 2014). Más de 100.000 visitantes en la exposición de los guerreros de Xian. *Abc.es*. Recuperado de <http://www.abc.es/madrid/20140402/abci-prorroga-terracota-army-201404021326.html>

Rae. (Sin fecha a). *Copia*. Recuperado de <http://dle.rae.es/?id=AknZiIz>

Rae. (Sin fecha b). *Facsímil*. Recuperado de <http://dle.rae.es/srv/fetch?id=HTTIM5F#7bG9O7r>

Rae. (Sin fecha c). *Réplica*. Recuperado de <http://dle.rae.es/srv/search?m=30&w=r%C3%A9plica>

Rae. (Sin fecha d). *Reproducción*. Recuperado de <http://dle.rae.es/srv/search?m=30&w=reproducción>

Real Academia de Bellas Artes de San Fernando. (Sin fecha). *Taller de vaciados*. Recuperado de <http://www.realacademiabellasartessanfernando.com/es/taller-de-vaciados/historia>

Sainz, M. (13 de marzo de 2012). Gipsoteca. [Entrada de blog]. *Escuela Superior de Diseño de la Rioja*. Recuperado de <http://www.esdir.eu/c/68/>

Sca. (Sin fecha). *The Friends of the Royal Tombs of Egypt* [Los amigos de las Tumbas Reales de Egipto]. Recuperado de <http://www.sca-egypt.org/eng/main.htm>

Supreme Council of Antiquities. (Sin fecha). *Principal Mission* [Misión principal]. Recuperado de <http://www.sca-egypt.org/eng/main.htm>

The Metropolitan Museum of Art. (Sin fecha). *Harry Burton (1879–1940): The Pharaoh's Photographer* [Harry Burton (1879-1940): el fotógrafo del faraón]. Recuperado de http://www.metmuseum.org/toah/hd/harr/hd_harr.htm

Theban Mapping Project. (Sin fecha). *Tomb numbering system in the valley* [Sistema de numeración de tumbas en el valle]. Recuperado de http://www.thebanmappingproject.com/articles/article_4.3.html

The Dong-a Ilbo. (2015). *The Lascaux cave paintings to be exhibited in Korea next year* [Las pinturas rupestres de Lascaux se exhibirán en Corea el próximo año]. Recuperado de <http://english.donga.com/List/3/all/26/410159/1>

Ventura, D. (23 de febrero de 2014). El sangriento elixir de millonarios. *Bbc.com*. Recuperado de http://www.bbc.com/mundo/noticias/2014/02/140207_cuerno_de_rinoceronte_finde

Vídeos

Bayod, C. [Factum Arte]. (20 de mayo de 2015). *LucidaLab Milano 3/5* [LucidaLab Milán, 3/5]. [Archivo de Vídeo]. Recuperado de <https://vimeo.com/128377423>

Bbc. [Bbc]. (21 de enero de 2013). *Will a mock-up of Tutankhamun's tomb pull in tourists?* [¿Una maqueta de la tumba de Tutankamón atraerá turistas?]. [Archivo de Vídeo]. Recuperado de http://news.bbc.co.uk/2/hi/programmes/fast_track/9786255.stm

Bbc. [Bbc]. (29 de abril de 2014). *Inside replica Tutankhamun tomb near Valley of the King's* [Dentro de la réplica de la tumba de Tutankhamon cerca del Valle del Rey].

[Archivo de Vídeo]. Recuperado de <http://www.bbc.com/news/av/world-middle-east-27201300/inside-replica-tutankhamun-tomb-near-valley-of-the-kings>

Factum Arte. [Factum Arte]. (12 de marzo de 2012). *The Tomb of Tutankhamun* [La Tumba de Tutankamón]. [Archivo de Vídeo]. Recuperado de <https://vimeo.com/3838395>

Factum Arte. [Factum Arte]. (29 de julio de 2013a). *Recording at Sala Bologna. Vatican City* [Grabando la Sala Bolonia]. [Archivo de Vídeo]. Recuperado de <https://vimeo.com/71251760>

Factum Arte. [Factum Arte]. (15 de marzo, 2013b). *Scanning Hereford mappa mundi* [Escaneando el Mapamundi de Hereford]. [Archivo de Vídeo]. Recuperado de <https://vimeo.com/61879428>

Factum Arte. [Factum Arte]. (12 de mayo de 2014). *Presentation of the Facsimile of the Tomb of Tutankhamun in Luxor* [Presentación del facsímil de la tumba de Tutankamón en Luxor]. [Archivo de Vídeo]. Recuperado de <http://vimeo.com/94978315>

López Asiaín, M. A. [Museo Nacional del Prado]. (17 de febrero de 2015). *Conferencia: Restauración pictórica de la Eucaristía de Rubens. Armonía de un conjunto*. [Archivo de Vídeo]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=G7JrJzveMqk>

Respuesta Creativa / Factum Arte. [Factum Arte]. (28 de noviembre de 2008). *Facsimile of the Dama de Elche* [Facsímil de la Dama de Elche]. [Archivo de Vídeo]. Recuperado de <https://vimeo.com/2370708>

Radio

Piña, C. M. (3 de agosto de 2015). Francia una referencia en materia de facsímiles de arte prehistórico. *RFI Español*. [Archivo de Radio], Recuperado de

<http://es.rfi.fr/francia/20150803-francia-una-referencia-en-materia-de-facsimiles-de-arte-prehistorico>

Referencias capítulo 7

Libros, artículos de revistas y conferencias

Alcalá, J. R. (2003). Creación en Internet: los nuevos museos de arte en PH. *Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, Año nº 11, Nº 46, 61-67.

Asenjo, M. E. (2014). *Aprendizaje informal y nuevas tecnologías: análisis y medición del constructo de interactividad en contextos de exposición del patrimonio* (Tesis Doctoral). Universidad Autónoma de Madrid, Madrid.

Bellido, M. L. (2013). *Arte y museos del siglo XXI: entre los nuevos ámbitos y las inserciones tecnológicas*. Barcelona, España: Editorial UOC.

Espinel, J. C. (2016). *Procesos digitales y sistemas de prototipado rápido aditivos aplicados a la creación escultórica de pequeño formato y relieves* (Tesis Doctoral). Universidad Complutense de Madrid, Madrid.

Hernández Hernández, F., (1992). Evolución del concepto de museo. *Revista general de información y documentación*, 2(1), 85-98.

Libros, revistas y congresos online

Alcalá, J. R. (2001a). Las nuevas tecnologías en el mundo de los museos. *Proceedings of the ICOMON meetings held in Madrid, Spain, 1999*. (pp.44-51). Recuperado de icomon.org/file_download/114/Alcala+1999.pdf

Alcalá, J. R. (2001b). El museo ante el reto de las nuevas tecnologías en el siglo XXI. *Binaria: Revista de comunicación, cultura y tecnología*, N°. 1. Recuperado de <http://abacus.universidadeuropea.es/bitstream/handle/11268/2801/Art%C3%ADculo%20de%20Jos%E2%80%A6am%C3%B3n%20Alcal%C3%A1.pdf?sequence=1>

Alcalá, J. R. (2003). Sistemas telemáticos compartidos: arquitecturas virtualizadas para un nuevo modelo de creación y la exhibición del arte electrónico contemporáneo. *Binaria: Revista de comunicación, cultura y tecnología*, N°. 3. Recuperado de http://abacus.universidadeuropea.es/bitstream/handle/11268/2854/jose_ramon_alcala_castellano.pdf?sequence=1

Asensio, M. y Asenjo, E., (n.d). Lazos de luz azul: del controvertido uso de las tics en museos. *Actas do I Seminário de Investigação em Museologia dos Países de Língua Portuguesa e Espanhola* (pp.87-98), Volume 3. Recuperado de <http://ler.letras.up.pt/uploads/ficheiros/8626.pdf>

Beale, G. & Reilly, P. (2014). Additive archaeology: the spirit of virtual archaeology reprinted [Arqueología aditiva: el espíritu de la arqueología virtual reimpressa]. *Archaeological Research in the Digital Age*. 1st Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology Greek Chapter (CAA-GR) Rethymno, Crete (pp. 120-130). Recuperado de <http://eprints.soton.ac.uk/374358/1/Reilly-libre.pdf>

Callieri, M., Ponchio, F., Cignoni P. & Scopigno, R. (2008). Virtual Inspector: a flexible visualizer for dense 3D scanned models [Virtual Inspector: un visualizador flexible para modelos densos escaneados en 3D]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, Volume: 28, Issue: 1, Ene-Feb. 2008,doi: 10.1109/MCG.2008.20

De Gross, M. & Lewin, J. S. (1996). Resolving archaeological site data with 3D computer modeling: The case of Ceren [Resolución de datos de sitios arqueológicos con modelado 3D en computadora: el caso de Ceren]. *ACADIA* (pp. 255-266). Recuperado de http://code.arc.cmu.edu/archive/dmgftp/public_html/publications/pdfs/ceren.pdf

Dell Unto, N. (2014). The Use of 3D Models for Intra-Site Investigation in Archaeology [El uso de modelos 3D para la investigación dentro del sitio en arqueología]. In Redondino, F. & Campana, S. (Eds.), *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage. Theory and best practices* (pp. 151-158). British Archaeological Reports. Recuperado de https://www.academia.edu/5719952/3D_Modeling_in_Archaeology_and_Cultural_Heritage_Theory_and_Best_Practices?auto=download

Felicísimo, A. Polo, M. E. y Peris, J. A. (2013). Three-Dimensional Models of Archaeological Objects: From Laser Scanners to Interactive PDF Documents. *Technical briefs in historical archaeology*, 7, 13-18. Recuperado de https://sha.org/assets/documents/Technical_briefs_articles/ThreeDimensionalModels.pdf

Frischerde, B. (2014). 3D Data capture, restoration and online publication of sculpture [Captura de datos 3D, restauración y publicación en línea de esculturas]. In Redondino, F. & Campana, S. (Eds.), *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage. Theory and best practices* (pp. 137-144). British Archaeological Reports. Recuperado de https://www.academia.edu/5719952/3D_Modeling_in_Archaeology_and_Cultural_Heritage_Theory_and_Best_Practices?auto=download

Galeazzi, F., Di Giuseppantonio, P. & Matthews, J. L. (2015). Comparing 2D pictures with 3D replicas for the digital preservation and analysis of tangible heritage [Comparación de imágenes 2D con réplicas 3D para la preservación digital y el análisis del patrimonio tangible]. *Museum Management and Curatorship*, 30(5), 462-483. doi: <https://doi.org/10.1080/09647775.2015.1042515>

Gómez Robles, L., Quirosa, V. y Fernández Ruiz, J. A. (2009). El patrimonio “intangible”. Infografía para preservar la memoria del pasado. *Arqueoweb, Revista sobre arqueología en*

internet, 12. Recuperado de
pendientedemigracion.ucm.es/info/arqueoweb/pdf/12/robles.pdf

Grande, A. (2013). La realidad virtual aplicada a la investigación y difusión del Patrimonio Arqueológico. En Junta de Castilla y León y Consejería de Cultura y Turismo (Eds.). *Actas VIII Congreso Internacional AR&PA 2012* (pp.6-21). Recuperado de <http://www.jcyl.es/web/jcyl/binarios/613/71/actasAR&PA2012.pdf>

Hilera, J. R., Otón, S. y Martínez, J. (1999). Aplicación de la Realidad Virtual en la enseñanza a través de Internet. *Cuadernos de documentación multimedia*, nº8. Recuperado de <http://pendientedemigracion.ucm.es/info/multidoc/multidoc/revista/num8/hilera-oton.html>

Jiménez, J. G., García, M., Revelles, J. y Melero, F. J. (2012). Digitalización 3D y Difusión en Web del Patrimonio de las Universidades Andaluzas mediante X3D Y WebGL. *Virtual Archeology Review*, 3(7), 55-59. doi:
<https://doi.org/10.4995/var.2012.4386>

Jung, H. J. (Sin fecha). Virtual reality modeling language. *Teaching English with Technology*, 2(5), 54-61. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/340974815/6-Virtual-Reality-Modeling-Language-by-Hee-jung-Jung-2002-5>

Lebrero, J. (2003). Patrimonio y Virtualidad en Creación en Internet: los nuevos museos de arte en PH. *Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, Año nº 11, Nº 46, 61-67. Recuperado de <http://www.iaph.es/revistaph/index.php/revistaph/article/view/1630/1630#.WHyYuNLhBdg>

López Fraile, F. J. (2007). La infografía 3D como sistema de documentación y divulgación. *Primer Simposio de la Investigación y Difusión Arqueopaleontológica en el Marco de la Iniciativa Privada*: Madrid, Guadalajara 24 y 25 de octubre de 2007 (pp. 429-444). Recuperado de https://www.academia.edu/1361731/La_infograf%C3%ADa_3D_como_sistema_de_documentaci%C3%B3n_y_divulgaci%C3%B3n

- Loscos, C., Tecchia, F., Frisoli, A., Carrozzino, M., Ritter, H., Swapp, D. & Bergamascon M. (2004). The Museum of Pure Form: touching real statues in an immersive virtual museum [El Museo de la Forma Pura: tocar estatuas reales en un museo virtual inmersivo]. *The 5th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST*. doi: <http://dx.doi.org/10.2312/VAST/VAST04/271-279>
- McCormick, B. H., Defanti, T. H. & Brown, M. D. (1987). Visualization in scientific computing [Visualización en computación científica]. *Computer Graphics*, 21(6). New York, NY: ACM Siggraph. Recuperado de <http://www.sci.utah.edu/vrc2005/McCormick-1987-VSC.pdf>
- Martín P., Llamas, J. M y Perán, J. R. (2013). Recuperación Virtual de Policromías Mediante Modelos 3D. En Junta de Castilla y León y Consejería de Cultura y Turismo (Eds.). *Actas VIII Congreso Internacional AR&PA 2012* (pp.78-88). Recuperado de <http://www.jcyl.es/web/jcyl/binarios/613/71/actasAR&PA2012.pdf>
- Martínez Usó, J. y Cabrera, A. (2014). Aplicación de las nuevas tecnologías para la difusión didáctica del patrimonio. *Monográfico*, nº 9, 779-788. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5385972.pdf>
- Pescarin, S. (2014). Virtual reality & Cyber archaeology-Virtual museums [Realidad virtual y ciberarqueología: museos virtuales]. In Redondino, F. & Campana, S. (Eds.), *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage. Theory and best practices* (pp. 130-134). British Archaeological Reports. Recuperado de https://www.academia.edu/5719952/3D_Modeling_in_Archaeology_and_Cultural_Heritage_Theory_and_Best_Practices?auto=download
- Reilly, P. (1989). Data Visualitacion in archaeology [Visualización de datos en arqueología]. *IBM Systems Journal*, 28(4), 569-579. Recuperado de http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/35679405/05387542.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAJ56TQJRTWSMTNPEA&Expires=1479980259&Signature=ndgU4HxA4VEkAojhJB%2BsBDDf7F4%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DData_Visualization_in_Archaeology.pdf

Reilly, P. (1996). Access to Insights: stimulating archaeological visualization in the 1990s [Acceder a la percepción: estimulante visualización arqueológica en la década de 1990]. In Gedai, I. (Ed.), *The Future of Our Past '93-'95* (pp 39-51). International Conference of Informatics. Budapest. Recuperado de https://www.academia.edu/19576909/Access_to_insights_stimulating_archaeological_visualisation_in_the_1990s?auto=download

Reilly, P. (2015). Putting the materials back into virtual archaeology. *Virtual archaeology (Methods and benefits): Proceedings of the Second International Conference held at State Hermitage Museum, 1-3 June 2015* (pp.12-23). The State Hermitage Publishers. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/281118354_Putting_the_Materials_back_into_Virtual_Archaeology

Reilly, P., Todd, S. & Walter, A. (2016). Rediscovering and modernising the digital Old Minster of Winchester [Redescubriendo y modernizando el Old Minster digital de Winchester]. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 3(2), 33-41. Recuperado de <http://fulltext.study/preview/pdf/108011.pdf>

Santana, M. (2014). 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage [Grabación 3D y Modelado en Arqueología y Patrimonio Cultural]. In Redondino, F. & Campana, S. (Eds.), *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage. Theory and best practices* (pp. 7-12). British Archaeological Reports. Recuperado de https://www.academia.edu/5719952/3D_Modeling_in_Archaeology_and_Cultural_Heritage_Theory_and_Best_Practices?auto=download

Rhyne, C. S. (1996). Computer Images for Research, Teaching, and Publication in Art History and Related Disciplines [Imágenes de computadora para investigación, enseñanza y publicación en historia del arte y disciplinas relacionadas]. *Visual Resources* (pp. 19-51), Commission on Preservation & Access, Washington, DC. Recuperado de <http://www.reed.edu/art/rhyne/papers/computer.html>

Ruíz Torres, D. (2011). Realidad aumentada y Patrimonio Cultural: nuevas perspectivas para el conocimiento y la difusión del objeto cultural. *e-rph. Revista electrónica de*

Patrimonio Histórico, n° 8. Recuperado de <http://www.revistadepatrimonio.es/revistas/numero8/difusion/estudios2/articulo.php>

Rodríguez Bernis, S. (2013). Presentación. Recursos audiovisuales en museos, pros y contras. *ICOM CE Digital*, 7. Recuperado de http://www.icom-ce.org/recursos/ICOM_CE_Digital/07/ICOM%20CE%20Digital%2007.pdf

Sánchez Climent, A. y Cerdeño Serrano, M. L. (2014). Propuesta metodológica para el estudio volumétrico de cerámica arqueológica a través de programas free-software de edición 3D: el caso de las necrópolis celtibéricas del área meseteña. *Virtual Archaeology Review*, 5(11), 20-33. Recuperado de polipapers.upv.es/index.php/var/issue/download/475/55

Santibáñez, J. (2006). Los museos virtuales como recurso de enseñanza-aprendizaje en Comunicar. *Revista científica de comunicación y educación*, 27, 155-162. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2089302.pdf>

Stanco, F., Tanasi, D., Allegra, D., Milotta, F., Lamagna, G. & Monterosso, G. (2017). Virtual anastylosis of Greek sculpture as museum policy for public outreach and cognitive accessibility [Anastylosis virtual de la escultura griega como política del museo para el alcance público y el acceso cognitivo]. *Journal of Electronic Imaging*, 26(1), 011025-1 - 011025-12. doi: 10.1117/1.JEI.26.1.011025.

Scopigno, R. (2012). Sampled 3D models for Cultural Heritage: Which uses beyond visualization? [Ejemplos de modelos tridimensionales para el Patrimonio Cultural: ¿Qué usos más allá de la visualización?] *Virtual Archaeology Review*, 3(5), 109-115. doi: <https://doi.org/10.4995/var.2012.4537>

Vlahakis, V., Ioannidis, M., Karigiannis, J., Tsotros, M., Gounaris, M., Stricker, D., ... Almeida, L. (2002). Archeoguide: An augmented reality guide for archaeologist sites [Archeoguide: una guía de realidad aumentada para sitios arqueológicos]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 22(5), 52-60. doi: 10.1109/MCG.2002.1028726

Zapatero, D. (2007). *Aplicaciones didácticas de la realidad virtual al museo pedagógico de arte infantil* (Tesis Doctoral). Universidad Complutense de Madrid, Madrid.

Recursos electrónicos

Augmented Reality Books. (Sin fecha). *¿Qué es la realidad aumentada?* Recuperado de <http://www.ar-books.com/interior.php?contenido=ra.php>

Bbc. (17 de octubre de 2016). Qué es la realidad aumentada, cómo se diferencia de la virtual y por qué Apple apuesta fuertemente a ella. *Bbc.com*. Recuperado de <http://www.bbc.com/mundo/noticias-37678017>

Caa. (Sin fecha). *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology* [Aplicaciones informáticas y métodos cuantitativos en arqueología]. Recuperado de <http://caa-international.org/>

Cifa. (Sin fecha). *Chartered Institute for Archaeologists* [Chartered Institute for Archaeologists]. Recuperado de <https://www.archaeologists.net/codes/cifa>

Cofán, M. F. (Sin fecha). *Museo pedagógico de arte infantil proyecto online*. Recuperado de <http://www.uv.es/~valors/Cofan,Fatima.pdf>

Desvallées, A. y Mairesse, F. (2010). *Conceptos claves de museología* (Córdoba A.). Recuperado de http://icom.museum/fileadmin/user_upload/pdf/Key_Concepts_of_Museology/Museologie_Espagnol_BD.pdf

Elsevier. (Sin fecha). *Interactive 3D models embedded in scientific articles on ScienceDirect* [Modelos 3D interactivos integrados en artículos científicos sobre ScienceDirect]. Recuperado de <https://www.journals.elsevier.com/digital-applications-in->

archaeology-and-cultural-heritage/news/interactive-3d-models-embedded-in-scientific-articles

Encyclopaedia Britannica. (Sin fecha). *Virtual museum* [Museo virtual]. Recuperado de <https://global.britannica.com/topic/virtual-museum>

Espinosa, A. (6 de marzo de 2015). El Estado Islámico arrasa la ciudad asiria de Nimrod en Irak. *El País.com*. Recuperado de https://elpais.com/internacional/2015/03/06/actualidad/1425633037_489384.html

Factum Foundation. (Sin fecha). *High Resolution Image Viewer* [Visor de imágenes de alta resolución]. Recuperado de <http://www.factumfoundation.org/pag/210/High-Resolution-Image-Viewer>

Geater, J. (Sin fecha). ¿Qué es la extensión de archivo WRL? [Entrada en blog]. *Solvusoft*. Recuperado de <http://www.solvusoft.com/es/file-extensions/file-extension-wrl/>

Google. (Sin fecha). *The British Museum*. Recuperado de https://www.google.co.uk/maps/@51.5190601,-0.1277005,2a,90y,261.66h,62.87t/data=!3m6!1e1!3m4!1s7C9PL0HIZSi24Pg-rV3_sw!2e0!7i13312!8i6656?hl=en

Google Earth. (Sin fecha). *Edificios 3D*. Recuperado de <https://www.google.es/intl/es/earth/explore/showcase/3dbuildings.html#tab=castles>

Google Arts & Culture. (Sin fecha a). *Página principal*. (Sin fecha). Recuperado de <https://www.google.com/culturalinstitute/beta/>

Google Arts & Culture. (Sin fecha b). *Musée d'Orsay, Paris*. (Sin fecha). Recuperado de https://www.google.com/culturalinstitute/beta/streetview/mus%C3%A9-d%E2%80%99orsay-paris/KQEnDge3UJkVmw?sv_h=289.10927981835886&sv_p=-4.304805389544299&sv_pid=FjndSjvl55w81vbNYu5DfA&sv_lid=6004477680878644429&sv_lng=2.327089926444387&sv_lat=48.85968476784497&sv_z=1

Gráfica. (23 de enero de 2017). El Museo Pushkin de Moscú expone seis obras adaptadas para invidentes mediante la tecnología Didú. [Entrada de blog]. *Gráfica*. Recuperado de http://graffica.info/museo-pushkin-tecnologia-didu-invidentes/?utm_source=Suscriptores+DIARIO&utm_campaign=d8ab191f16-Newsletter+Diario&utm_medium=email&utm_term=0_9b8b3b36c6-d8ab191f16-425468657&ct=t%28RSS_EMAIL_CAMPAIGN%29&mc_cid=d8ab191f16&mc_eid=dbe90efcdc

Imprimalia 3D. (2014). *Libros táctiles impresos en 3D para niños ciegos*. Recuperado de <http://imprimalia3d.com/recursosimpresion3d/libros-t-ctiles-impresos-3d-ni-os-ciegos>

Ioannides, M. (Sin fecha). *Project Mosul: Protecting Iraq's Cultural Heritage. The Mosul Museum collections are in danger and need the support of the GLAM community* [Proyecto Mosul: proteger el patrimonio cultural de Iraq. Las colecciones del Museo de Mosul están en peligro y necesitan el apoyo de la comunidad GLAM.]. Recuperado de <http://www.digitalmeetsculture.net/article/project-mosul-protecting-iraqs-cultural-heritage/>

La túnica de Neso. (17 de marzo de 2017). El teatro romano de Segóbriga recupera (de forma virtual) todo su esplendor. [Entrada de blog]. *La túnica de Neso*. Recuperado de <https://latunicadeneso.wordpress.com/2017/03/17/el-teatro-romano-de-segobriga-recupera-de-forma-virtual-todo-su-esplendor/>

Lamarca, M. J. (Sin fecha). El nuevo concepto de documento en la cultura de la imagen. [Entrada en blog]. *Hipertexto*. Recuperado de <http://www.hipertexto.info/documentos/hipertexto.htm>

Mañana-Borrazás, P. (2014). *Utilidades del pdf 3D*. Recuperado de http://digital.csic.es/bitstream/10261/63515/4/v2_es_PDF3D_guia_usuario.pdf

Maquetas Arsanz. *Galería*. Recuperado de http://www.maquetasarsanz.com/maquetas_arsanz_002.htm

Marqués, F. N. (Sin fecha a). *Patrimonio virtual y divulgación cultural*. Recuperado de <http://nestormarques.com/#patrimonio>

Marqués, F. N. (Sin fecha b). *Tecnología nueva, colecciones antiguas*. Recuperado de <http://nestormarques.com/tecnologia-nueva-colecciones-antiguas/>

Ministerio de Educación. (Sin fecha). *Educación inclusiva: Discapacidad visual. Módulo 9: Adaptación del material*. Recuperado de http://www.ite.educacion.es/formacion/materiales/129/cd/pdf/m9_dv.pdf

Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. (Sin fecha a). *Museo Sefardí*. Recuperado de <http://www.mecd.gob.es/msefardi/museo.html>

Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. (Sin fecha b). *Visitas virtuales de los Museos*. Recuperado de <http://www.mecd.gob.es/cultura-mecd/areas-cultura/museos/visitas-virtuales.html>

Monteiro, P. (Sin fecha). *Computer Graphics in Archaeology* [Gráficos por computadora en arqueología]. Recuperado de paginas.fe.up.pt/~aas/pub/Aulas/DiCG/PaulaMonteiro.pdf

Museo Arqueológico Nacional. (2014). *El MAN presenta su programa de accesibilidad*. Recuperado de <http://www.man.es/man/museo/prensa/Notas-de-prensa/2014/2014-05-26-Accesibilidad.html>

Museo del Prado. (Sin fecha a). *La Fragua de Vulcano*. Recuperado de <https://www.museodelprado.es/coleccion/obra-de-arte/la-fragua-de-vulcano/84a0240d-b41a-404d-8433-6e4e2efd21ab>

Museo del Prado. (Sin fecha b). *Hoy toca el Prado*. Recuperado de <https://www.museodelprado.es/actualidad/exposicion/hoy-toca-el-prado/29c8c453-ac66-4102-88bd-e6e1d5036ffa>

Museo Tiflológico. (Sin fecha). *Once*. Recuperado de <http://museo.once.es/home.cfm?id=1&nivel=1>

Museos de la región de Murcia. (Sin fecha). *V El Dibujo Arqueológico*. Experiencias didácticas del Museo del Cigarralejo (Mula, Murcia). Cuadernos experiencias didácticas.

Recuperado de

http://www.museosdemurcia.com/museos.material_didactico?museo=museo-de-arte-ib%E9rico-el-cigarralejo-de--mula&id=5

Netquest. (2014). *La escala de Likert: qué es y cómo utilizarla*. Recuperado de <https://www.netquest.com/blog/es/blog/es/la-escala-de-likert-que-es-y-como-utilizarla>

Nframes. (Sin fecha). *Empowering photogrammetry with sure software* [Potenciando la fotogrametría con un software seguro]. Recuperado de www.nframes.com

Oi2. (Sin fecha). *Digitalización de las maravillas del mundo*. [Recuperado de <http://www.oi2.es/noticias/41-digitalizaci%C3%B3n-de-las-maravillas-del-mundo.html>

Pastrana, E. (20 de junio de 2012). ¿Qué son los lobbies y que poder tienen en España? *Abc.es*. Recuperado de <http://www.abc.es/20120620/economia/abci-quienes-lobbies-poder-tienen-201206191413.html>

Project Mosul. (Sin fecha). *Rekrei*. Recuperado de <https://projectmosul.org/>

Proyecto Lazos de luz azul. (2009). *Estándares de Calidad en la utilización de la Tecnología para el Aprendizaje en Museos y Espacios de Presentación del Patrimonio*. Recuperado de <http://web.uam.es/proyectosinv/idlla/>

Ruíz, C. (27 de febrero de 2015). El Bamiyán de Irak. *El Mundo.es*. Recuperado de <http://www.elmundo.es/internacional/2015/02/27/54efc05e268e3e6c048b4576.html>

Serrat, N. (Sin fecha). *El museo virtual posee unas características de interactividad que permiten una gran participación por parte del usuario*. Recuperado de http://museosvirtuales.azc.uam.mx/sistema-de-museos-virtuales/sinapsis/museo_virtual.html#ventajas

Subirats, R. (Sin fecha). *Galerías virtuales de arte online*. Recuperado de <http://www.razgo.net/blog/galerias-virtuales-arte-online/>

Ted. (Sin fecha). *2500+ talks to stir your curiosity, find just the right one*. Recuperado de <https://www.ted.com/talks?language=es>

The Economist. (20 de mayo de 2016a). Introducing “RecoVR Mosul”, The Economist’s first VR experience [Presentamos "RecoVR Mosul", la primera experiencia de realidad virtual de The Economist.]. *The Economist.com*. Recuperado de <https://www.economist.com/blogs/prospero/2016/05/virtual-reality>

Turismo in Toscana. (Sin fecha). *Il Museo delle pure forme a Pisa. Una galleria virtuale grande come l’Europa* [El Museo de formas puras en Pisa. Una galería virtual tan grande como Europa]. Recuperado de <http://www.turismo.intoscana.it/site/it/elemento-di-interesse/Il-Museo-delle-pure-forme-a-Pisa/>

Universitat de Barcelona. (2011). *Nuria Serrat Antolí*. Recuperado de <http://www.ub.edu/fodip/miembros/nuria-serrat-antoli/>

Virtual Museum Transnational Network. (2011). *The Museum of Pure Form* [El Museo de la Forma Pura]. Recuperado de <http://www.v-must.net/virtual-museums/vm/museum-pure-forms>

Visuarteck. (Sin fecha). *Diferencia entre realidad aumentada y realidad virtual*. Recuperado de <http://www.visuarteck.com/aplicaciones-a-medida/realidad-aumentada-aplicaciones/>

Winchester Cathedral. (Sin fecha). *Our History* [Nuestra historia]. Recuperado de <http://www.winchester-cathedral.org.uk/our-heritage/our-history/>

Winchester Excavations Committee. (Sin fecha). *Excavations* [Excavaciones]. Recuperado de <http://winchesterstudies.org.uk/excavations/>

Vídeos

CNR Pisa. [CNR Pisa]. (14 de diciembre de 2011). *Il Museo delle Pure Forme* [El Museo de la Forma Pura] [Archivo de vídeo]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=IdwywwWca7k>

Coughenour. C. [TEDx Talks]. (18 de julio de 2016). *How to Crowdfund the Reconstruction of Lost Heritage* [¿Cómo crowdfund la reconstrucción del patrimonio perdido?]. [Archivo de vídeo]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=fCQpMgb7GMO>

The Economist. [The Economist]. (20 de mayo de 2016b). *RecoVR: Mosul, a collective reconstruction* [RecoVR: Mosul, una reconstrucción colectiva]. [Archivo de vídeo]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=0EazGA673fk&feature=youtu.be>

People Art Factory. [People Art Factory]. (21 de marzo de 2014). *Tutorial PeopleArtFactory.com*. [Archivo de vídeo]. Recuperado de https://www.youtube.com/watch?v=LhiNnU-Hm_U

Radio New Zealand. [Radio New Zealand]. (Sin fecha) *Project Mosul* [Proyecto Mosul]. [Archivo de vídeo]. Recuperado de <https://vimeo.com/136271217>

Reilly, P. [Paul Reilly]. (Sin fecha). *The Old Minster, Winchester (2nd Version, 1985)* [The Old Minster, Winchester (2ª versión, 1985)]. [Archivo de vídeo]. Recuperado de <https://vimeo.com/170699480>

Referencias capítulo 8

Libros, artículos de revistas y conferencias

Berjano, R. y Fernández Colón, P. (2003). El valor documental de las copias. *Pátina*, 12, 85-89.

Espín, D. (1996). *Los derechos de autor de obras de arte*. Madrid, España: Cívitas.

López-Menchero, V. M. y Grande, A. (2011). La carta de Sevilla. Avances hacia el primer borrador de la carta internacional de la arqueología virtual. En Grande A., López-Menchero V. M., Hernández-Barahona, A. (Eds.) *Actas Arqueológica 2.0 2011, III Congreso Internacional de arqueología e informática gráfica, Patrimonio e innovación, arqueológica 2.0* (pp.33-37). Sevilla, España: Sociedad Española de Arqueología Virtual.

Macarrón, A. M. y González Mozo, A. (2011). *La conservación y la restauración en el siglo XX*. 3ª Edición, Madrid, España: Tecnos.

Macarrón, A. M. (2013). *Historia de la conservación y la restauración. Desde la antigüedad hasta el siglo XX*. 3ª Edición, Madrid, España: Tecnos.

Martínez, M.J, Sánchez-Mesa, D. y Sánchez-Mesa, L. (2008). *Historia y teoría de la conservación y restauración artística*. 3ª Edición, Madrid, España: Tecnos.

Pereira, C. (1999). Facsímiles de objetos de arte tridimensional 2º Parte: Vaciado. *Restauración & Rehabilitación*, 26, 66-71.

Santos, S. (2016). La conservación del arte contemporáneo. Criterios y metodologías de actuación en obras configuradas con nuevos materiales. Asturias, España: Ediciones Trea.

Libros, revistas y congresos online

Álvarez, F. J. y Vives, J. (2009). Las políticas internacionales de digitalización y su desarrollo en España. *La digitalización del patrimonio: Archivos, bibliotecas y museos en la red* (pp. 25-86). Recuperado de <http://reader.digitalbooks.pro/book/preview/29078/Section0006.xhtml?1511522238392>

Angás, J. (2011). Valorización, difusión y estandarización de la documentación geométrica del patrimonio. En Domingo, M. y Sánchez A. (Eds.). *Documentación Gráfica del Patrimonio* (pp. 154-163). Recuperado de <http://es.calameo.com/read/0000753358b142b1c934c>

Grande, A. (2013). La realidad virtual aplicada a la investigación y difusión. En Junta de Castilla y León y Consejería de Cultura y Turismo (Eds.) *Actas VIII Congreso Internacional AR&PA 2012* (pp.6-21). Recuperado de <http://www.jcyl.es/web/jcyl/binarios/613/71/actasAR&PA2012.pdf?>

De la Torre-Cantero, J., Saorín, J. L., Meier, C., Melián-Díaz, D. y Drago-Díaz, M. (2015). Creación de réplicas de patrimonio escultórico mediante reconstrucción 3D e impresoras 3D de bajo coste para uso en entornos educativos. *Arte, Individuo y Sociedad*, 2015, 27 (3), 429-446. Recuperado de <http://revistas.ucm.es/index.php/ARIS/article/view/45864/46408>

Escriba, F. y Madrid, J. A. (2011). El mundo virtual en la restauración. Aplicaciones virtuales para la conservación y restauración del patrimonio. Arché, Publicación del instituto universitario de restauración del patrimonio de la UPV, 4 y 5, 11-20. Recuperado de http://www.irp.webs.upv.es/documents/arche_article_122.pdf

Gómez Robles, L. Quirosa, V. y Fernández Ruiz, J. A. (2009). El patrimonio “intangible”. Infografía para preservar la memoria del pasado. *Arqueoweb, Revista sobre arqueología en internet*, 12. Recuperado de pendientedemigracion.ucm.es/info/arqueoweb/pdf/12/robles.pdf

Grande, A. y López-Menchero, V. M. (2011). The implementation of an international charter in the field of virtual archaeology [La implementación de una carta internacional en el campo de la arqueología virtual]. In Pavelka, K. (Ed.), *Proceedings XXIIIrd International CIPA Symposium*. Prague, Czech Republic: Czech Technical University in

Prague, Faculty of Civil Engineering. Recuperado de https://www.academia.edu/20124021/The_implementation_of_an_International_Charter_in_the_field_of_Virtual_Archaeology

López-Menclero, V. M. (2011). Propuesta para profundizar en La Carta de Londres y mejorar su aplicabilidad en el campo del patrimonio arqueológico. *Virtual Archaeology Review*, 2(4), 65-69. Recuperado de <https://polipapers.upv.es/index.php/var/article/view/4557/4691>

Rodríguez Silgo, A. (2015). Digitalización y virtualización del patrimonio cultural. Hacia un nuevo horizonte en la conservación-restauración. En Fundación Telefónica (Ed.), *TELOS*, Cuadernos de Comunicación e Innovación, 102, 1-8. Recuperado de <https://telos.fundaciontelefonica.com/url-direct/pdf-generator?tipoContenido=articuloTelos&idContenido=2015110316500003&idioma=es>

Recursos electrónicos

Blankstein, A. (27 de abril de 2010). Art dealer agrees to plea deal in \$2-million sale of fake Picasso. [El vendedor de arte acepta negociar la venta de un falso Picasso por \$ 2 millones]. [Entrada en Blog]. *Los Angeles Times*. Recuperado de <http://latimesblogs.latimes.com/lanow/2010/04/westside-art-dealer-agrees-to-plea-deal-in-sale-of-2-million-fake-picasso.html>

Caa. (Sin fecha). *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*. [Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology]. Recuperado de <http://caa-international.org/>

Carta de Atenas. (1931). *Carta de Atenas para la restauración de monumentos históricos*. Recuperado de

<http://www.icomoscr.org/doc/teoria/VARIOS.1931.carta.atenas.restauracion.monumentos.historicos.pdf>

Carta de Londres. (2006). *La Carta de Londres*. Recuperado de http://www.londoncharter.org/fileadmin/templates/main/docs/london_charter_1_1_es.pdf

Carta del Rilievo. (2000). *Declaración sobre el levantamiento arquitectónico. Carta del Rilievo*. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/357872577/Carta-Del-Rilievo-2000>

Carta de Venecia. (1964). *Carta internacional sobre la conservación y la restauración de monumentos y sitios (Carta de Venecia 1964)*. Recuperado de https://www.icomos.org/charters/venice_sp.pdf

Cifa. (Sin fecha). *Chartered Institute for Archaeologists*. [Chartered Institute for Archaeologists]. Recuperado de <https://www.archaeologists.net/codes/cifa>

Círculo de Bellas Artes. (2013). *Madrid acoge la primera gran muestra sobre el falsificador Elmyr de Hory, 6 de febrero de 2013 al 12 de mayo de 2015*. Recuperado de <http://www.circulobellasartes.com/exposiciones/elmyr-hory-proyecto-fake/>

Directrices prácticas para la aplicación de la convención del Patrimonio Mundial. (2008). *Directrices prácticas para la aplicación de la convención del Patrimonio Mundial*. Recuperado de <http://whc.unesco.org/archive/opguide08-es.pdf>

Documento de Nara. (1994). Conferencia de Nara sobre Autenticidad 1994. Recuperado de <http://www.icomoscr.org/doc/teoria/DOC.1994.nara.documento.sobre.autenticidad.pdf>

Fahrenheit Magazine. (15 de julio de 2014). El arte de la estafa: los mejores falsificadores de arte. *Fahrenheit Magazine.com*. Recuperado de <http://fahrenheitmagazine.com/fotografias/el-arte-de-la-estafa-los-mejores-falsificadores-de-arte/>

Innova. (2012). *Virtual Archaeology International Network. Estatutos de la Asociación, Sevilla*. Recuperado de <http://www.virtualarchaeology.net/>

Ley de Patrimonio Histórico Español, LPHE. (1985). *Ley 16/1985, de 25 de junio, del Patrimonio Histórico Español*. Recuperado de <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1985-12534>

Los Principios de Lund. (2001). Recuperado de http://patrimonio.red.es/documentos/Principios_de_Lund.pdf

Los Principios de Sevilla. (2011). *Los principios de Sevilla. Principios internacionales de la arqueología virtual*. Recuperado de <http://smartheritage.com/wp-content/uploads/2016/06/PRINCIPIOS-DE-SEVILLA.pdf>

Ley de Protección Intelectual, LPI. (1987). *Ley 22/1987, de 11 de noviembre, de Propiedad Intelectual*. Recuperado de <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1987-25628>

Mecd. (Sin fecha). *Gestión del Patrimonio Cultural en las Comunidades Autónomas*. Recuperado de <https://www.mecd.gob.es/cultura-mecd/areas-cultura/patrimonio/informacion-general/gestion-autonomica.html>

Muñoz, E. (7 de noviembre de 2014). Los derechos de explotación de una obra, Propiedad intelectual e industrial. [Entrada en blog]. *Eva Muñoz Deiros. Abogado en nuevas tecnologías*. Recuperado de <http://evamunoz.es/derechos-explotacion-obra/>

Paterna, M. (5 de noviembre de 2015). Falsificadores de arte, a la caza del impostor. *RTVE.es*. Recuperado de <http://www.rtve.es/noticias/20151105/falsificadores-arte-caza-del-impostor/1245460.shtml>

Principios para la Creación de Archivos Documentales de Monumentos, Conjuntos Arquitectónicos y Sitios Históricos y Artísticos (1966). *Principios para la Creación de Archivos Documentales de Monumentos, Conjuntos Arquitectónicos y Sitios Históricos y*

Artísticos (1966). Recuperado de http://www.esicomos.org/Nueva_carpeta/info_DOC_ARCHIVOS.htm

Rae. (Sin fecha). *Título oneroso*. Recuperado de <http://dle.rae.es/srv/fetch?id=Zu7EOGZ#3v1zSCu>

Seav. (2008). *Sociedad Española de Arqueología Virtual. Estatutos de la Asociación, Dos Hermanas, Sevilla, 2008*. Recuperado de <http://smartheritage.com/seav>

Vegap. (Sin fecha). Participación. Recuperado de <http://www.vegap.es/participacion>

Vídeos

Rtve. [Rtve]. (6 de febrero de 2013). *Madrid acoge la primera gran muestra sobre el falsificador Elmyr de Hory*. [Archivo de vídeo]. Recuperado de <http://www.rtve.es/noticias/20130206/madrid-acoge-primera-gran-muestra-sobre-falsificador-elmyr-hory/606914.shtml>

Referencias capítulo 9

Libros, artículos de revistas y conferencias

De Las Heras, E. (2003). *La Escultura Pública en Valencia. Estudio y Catálogo* (Tesis Doctoral). Universitat de Valencia, Valencia.

Espinel, J. C. (2016). *Procesos digitales y sistemas de prototipado rápido aditivos aplicados a la creación escultórica de pequeño formato y relieves* (Tesis Doctoral). Universidad Complutense de Madrid, Madrid.

Gil, R. (2015). *Protocolos de Conservación y Restauración aplicables a la Colección de Aves y Mamíferos Naturalizados del Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid* (Tesis Doctoral). Universidad Complutense de Madrid, Madrid.

Riesco, A. (2017). *Métodos cuantitativos para la reconstrucción de la columna vertebral torácica en anatomía evolutiva humana* (Trabajo de Fin de Máster). Universidad Complutense de Madrid y Universidad de Alcalá, Madrid.

Rothhammer, F. y Llop, E. (2004). *Poblaciones chilenas: cuatro décadas de investigaciones bioantropológicas*. Santiago, Chile: Universitaria Chile.

Libros, revistas y congresos online

Bastir, M., García-Martínez, D., Coquerelle, M., Barash, A. & Recheis, W. (2012). Systems-approaches to skeletal variation in paleoanthropology: the human thorax [Sistemas-enfoques a la variación esquelética en paleoantropología: el tórax humano]. *Book of Abstracts of the II Anual European Society for the Study of Human Evolution meeting. Conference II Anual European Society for the Study of Human Evolution meeting*, p.14. doi: 10.13140/RG.2.1.3970.1601

Bastir, M., García-Martínez, D., Estalrich, A., García-Tabernero, A., Huguet, R., Ríos, L., ... Rosas A. (2015). The relevance of the first ribs of the El Sidron site (Asturias, Spain) for the understanding of the Neandertal thorax [La relevancia de las primeras costillas del

sitio El Sidron (Asturias, España) para la comprensión del tórax Neandertal]. *Journal of Human Evolution*, 80, 64-73. doi: 10.1016/j.jhevol.2014.10.008

Bastir, M., García-Martínez, D., Williams, S., Meyer M., Nalla S., Schmid, P., ... Berger, L. (2017). Geometric morphometrics of hominoid thoraces and its bearing for reconstructing the ribcage of H. Naledi [Morfometría geométrica de los tórax homínidos y su portador para la reconstrucción de la caja torácica de H. Naledi]. *American Association of Physical Anthropologists, Volume: S64, 86th Annual Meeting of the American Association of Physical Anthropologists*. New Orleans, LA. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/315810712_Geometric_morphometrics_of_hominoid_thoraces_and_its_bearing_for_reconstructing_the_ribcage_of_H_naledi

Berger, L. R., Hawks, J., Ruiters, D. J., Churchill, S. E., Schmid, P., Deleuzene, L. K., ... Zipfel, B. (2015). Homo Naledi, a new species of the genus Homo from the Dinaledi Chamber, South Africa [Homo Naledi, una nueva especie del género Homo de la Cámara Dinaledi, Sudáfrica]. *eLife*, 4:e09560. doi: <https://doi.org/10.7554/eLife.09560.001>

Bookstein, F.L. (1996). Biometrics, biomathematics and the morphometric synthesis. *Bulletin of Mathematical Biology*, 58(2), 313-365. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8713662>

Dirsk P., Roberts, E., Hilbert-Wolf, H., Kramers, J., Hawks, J., Dosseto, A., ... Berger, L. (2017). The age of Homo Naledi and associated sediments in the Rising Star Cave, South Africa [La edad del Homo Naledi y los sedimentos asociados en la cueva Rising Star, Sudáfrica]. *eLife*, 6:e24231. doi: <https://doi.org/10.7554/eLife.24231.001>

García-Martínez, D., Bastir, M., Huguet, R., Estalrich, A., García-Tabernero, A., Ríos, L., ... Rosas, A. (2017). The costal remains of the El Sidrón Neanderthal site (Asturias, northern Spain) and their importance for understanding Neanderthal thorax morphology [Los restos costales de El Sidrón, sitio Neanderthal (Asturias, norte de España) y su importancia para comprender la morfología del tórax neandertal]. *Journal of Human Evolution*, 111, 85-101. doi: 10.1016/j.jhevol.2014.10.008

San Andrés, M. (2015). Introducción. En Universidad Complutense de Madrid, Vicerrectorado de Extensión Universitaria, Cultura y Deporte, Unidad de Gestión del Patrimonio Histórico (Eds.), *Museos y Colecciones de la Universidad Complutense de Madrid* (pp.4 y 5). Recuperado de <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-436/GUIA%20MUSEOS%20Y%20COLECCIONES%20UCM.pdf>

Santos, S. (2017a). El empleo de las tecnologías 3D en la conservación del patrimonio y su aplicación en la realización de reproducciones de bienes culturales. *Observar*, 1(11), 97-114. Recuperado de <http://www.observar.eu/site/new.php?nid=90>

Santos, S., Zurdo, L., Ávila, M., De Arriba, P., Bonnin, P., Galán, M., Tena, S., Terrón, P., Blanch, E. y Gil, R. (2018). Aplicación de la tecnología 3D en la restauración del conjunto escultórico Los Portadores de la Antorcha, de la Ciudad Universitaria de Madrid. *Arte, Individuo y Sociedad*, Ediciones Complutense, 30(1), 61-75 doi: <http://dx.doi.org/10.5209/ARIS.55743>

Sawyer, G.J. & Maley, B. (2005). Neanderthal Reconstructed [Neandertal reconstruido]. *The Anatomical Record*, Part B, 283B(1), 23-31. doi: 10.1002/ar.b.20057

Weber G. W. (2015). Virtual Anthropology [Antropología virtual]. *Am. J. Phys. Anthropol*, 156, 22–42. doi: <https://doi.org/10.1002/ajpa.22658>

Recursos electrónicos

3Dhubs. (Sin fecha). *Makerbot, Replicator 2*. Recuperado de <https://www.3dhubs.com/3d-printers/makerbot-replicator-2>

Anatolandia. (2013). *Columna vertebral y sus articulaciones*. Recuperado de <http://www.anatolandia.com/2013/10/columna-vertebral-articulaciones.html>

Autodesk. (2015). *About Creating 3D Wireframe Models*. Recuperado de <https://knowledge.autodesk.com/support/autocad/getting-started/caas/CloudHelp/cloudhelp/2016/ENU/AutoCAD-Core/files/GUID-84E193D7-A18D-4EE2-B978-19E4AFBCAEEC-htm.html>

Bone Clones. (2007). *Neanderthal Skeleton Articulate* [Esqueleto Neandertal articulado]. Recuperado de <https://boneclones.com/product/neanderthal-skeleton-articulated-SC-019-A>

Clínica Universidad Navarra. (Sin fecha). *Faceta articular*. Recuperado de <https://www.cun.es/diccionario-medico/terminos/faceta-articular>

Corbella, J. (22 de septiembre de 2017). La cueva de los trece cadáveres. El yacimiento del Sidrón, en Asturias, es el más rico del mundo para estudiar el ADN de los neandertales. *La Vanguardia.com*. Recuperado de <http://www.lavanguardia.com/ciencia/20170922/431463733990/cueva-sidron-asturias-trece-cadaveres-neandertales.html>

Efe. (5 de febrero de 2007). Científicos españoles hallan restos de un saurópodo de 7 metros en Níger. *El Periódico.com*. Recuperado de <http://www.elperiodico.com/es/sociedad/20070205/cientificos-espanoles-hallan-restos-de-un-sauropodo-de-7-metros-en-niger-5426879>

Espalda. (2016). *Los discos intervertebrales*. Recuperado de http://www.espalda.org/divulgativa/como_es_funciona/discos.asp

Europa Press. (5 de septiembre de 2010). Denuncian el lamentable estado de la escultura 'Los portadores de la antorcha', símbolo de Ciudad Universitaria. *Qué!.es*. Recuperado de <http://www.que.es/madrid/201009051203-denuncian-lamentable-estado-escultura-los-epi.html>

Feroxa. (Sin fecha). *Fibra de Vidrio Mat de Refuerzo 300 grm*. Recuperado de <http://www.feroxa.com/es/fibras-de-vidrio-y-tejidos-de-refuerzo/124-fibra-de-vidrio-mat-de-refuerzo-300-grm.html>

Godzillin, (14 de diciembre de 2006). Nueva Fase del Proyecto Paldes (Paleontología para el desarrollo en Niger). [Entrada en Blog]. Recuperado de <http://godzillin.blogspot.com.es/2006/12/nueva-fase-del-proyecto-paldes.html>

Martín, A. (3 de abril de 2017a). Los portadores ya vuelven a tener su antorcha en Tribuna Complutense. *Tribuna Complutense.ucm.es*. Recuperado de <http://www.tribuna.ucm.es/193/art2720.php#.Wmm9z7ziZdg>

Martín, A. (30 de marzo de 2017b). La Ciudad Universitaria celebra sus 90 años en Tribuna Complutense. *Tribuna Complutense.ucm.es*. Recuperado de <http://tribuna.ucm.es/192/art2710.php#.Wmm9orziZdg>

Museo Nacional de Ciencias Naturales. (Sin fecha). *Markus Bastir*. Recuperado de http://www.mncn.csic.es/seccion=1356&idioma=es_ES&id=2011053107560001&activo=11.do

Museo Nacional de Ciencias Naturales. (2015). *Investigadores del MNCN participan en la descripción de Homo naledi, una nueva especie de homínido*. Recuperado de <http://www.mncn.csic.es/index.jsp?seccion=1329&id=2015090913180001&activo=12>

Museo Nacional de Ciencias Naturales. (2016). *Anuncian las especies Top 10 descubiertas en 2015*. Recuperado de <http://www.mncn.csic.es/index.jsp?seccion=1329&id=2016052309590001&activo=12>

Tr3sdland. (Sin fecha). *Ultimaker 3 Extended Impresora 3d doble extrusor*. Recuperado de <https://ultimaker.tr3sdland.com/producto/ultimaker-3-extended-impresora-3d-doble-extrusor/>

Ucm. (2014). *Incorporación de la tecnología 3D a las enseñanzas de las asignaturas de conservación-restauración de bienes culturales y a las vinculadas al ámbito escultórico*. Proyecto de Innovación y Mejora de la Calidad Docente. Convocatoria 2014. Nº de proyecto 105. Nombre del responsable del proyecto: Sonia Santos Gómez. Facultad de Bellas Artes. Departamentos de Pintura y Restauración/Escultura. Recuperado de

<http://eprints.ucm.es/27953/1/MEMORIA%20FINAL%20PROYECTO%20IMPRESORA%20DEFIN%202014.pdf>

Ucm. (2015). *Aplicación de la tecnología 3D a la conservación de arte contemporáneo como solución al robo y desaparición de fragmentos de esculturas. Caso de estudio: Los Portadores de la Antorcha*. Proyecto de Innovación y Mejora de la Calidad Docente. Convocatoria 2014. N° de proyecto 171. Nombre del responsable del proyecto: Sonia Santos Gómez. Facultad de Bellas Artes. Departamentos de Pintura y Restauración/Escultura. Recuperado de <http://eprints.ucm.es/36203/5/MEMORIA%20FINAL%20PROYECTO%20IMPRESORA%20DEFIN%202015.pdf>

Ucm. (2017a). *Aplicación de la tecnología 3D a la conservación de arte contemporáneo como solución al robo y desaparición de fragmentos de esculturas. Caso de estudio: Los Portadores de la Antorcha (Parte II)*. Proyecto de Innovación y Mejora de la Calidad Docente. Convocatoria 2014. N° de proyecto 194. Nombre del responsable del proyecto: Sonia Santos Gómez. Facultad de Bellas Artes. Departamentos de Pintura y Restauración/Escultura. Recuperado de <http://eprints.ucm.es/42712/1/MEMORIA%20FINAL%20PROYECTO%20ANTORCHA%20PARTE%20II.pdf>

Ucm. (7 de septiembre de 2017b). La Complutense y la Hispanic Society organizan una jornada sobre Archer M. Huntington en el 90 aniversario de la Ciudad Universitaria. *Gabinete de Comunicación de la UCM*. Recuperado de <https://www.ucm.es/complutense-huntington-90-aniversario-ciudad-universitaria->

Ucm. (Sin fecha a). *Museo de Farmacia Hispana*. Recuperado de <https://www.ucm.es/m.farmacia>

Ucm. (Sin fecha b). *Museos y Colecciones Complutenses*. Recuperado de <https://www.ucm.es/colecciones>

Ucm. (Sin fecha c). *Facultad de Bellas Artes*. Recuperado de <http://bellasartes.ucm.es/presentacion>

Uned. (Sin fecha a). *Historia de la Universidad Complutense de Madrid*. Recuperado de http://open.ieec.uned.es/HussoDigital/?page_id=1710

Uned. (Sin fecha b). *Portadores de la Antorcha. Campus Husso Digital*. Recuperado de http://open.ieec.uned.es/HussoDigital/?page_id=187

Quirós, G. (2017). *Descripción del estado de conservación del grupo escultórico “Los portadores de la antorcha”*. enviado POR MAIL guillermo

Vídeos

Rtve. [No-Do, nº 646B]. (23 de mayo de 1955). *Madrid. Los Portadores de la Antorcha. Donación generosa de una hispanista a la Ciudad Universitaria*. [Archivo de vídeo]. Recuperado de <http://www.rtve.es/filmoteca/no-do/not-646/1480926/>

Rtve. [Telediario Rtve]. (2 de noviembre de 2015). *El laboratorio de morfología virtual del CSIC investiga la fisiología del Homo Naledi*. [Archivo de vídeo]. Recuperado de <http://www.rtve.es/alaharta/videos/telediario/laboratorio-morfologia-virtual-del-csic-investiga-fisiologia-del-homo-naledi/3344376/>

Santos, S. [Sonia Santos Gómez]. (7de marzo de 2015a). *Video Proy impresora 3D Parte 1*. [Archivo de vídeo]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=HjlsfFmXspk>

Santos, S. [Sonia Santos Gómez]. (18 de mayo de 2015b). *Video Proy impresora 3D Parte 2*. [Archivo de vídeo]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=SNOWKOQ0jEg>

Santos, S. [Sonia Santos Gómez]. (12 de mayo de 2017b). *Video realización reproducción los portadores de la antorcha*. [Archivo de vídeo]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=9296qPdNpoE&feature=youtu.be>

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figuras

Fig. 1. González, A. (2013). *Sin título*. [Ilustración]. Recuperado de <http://tallerdetallaenmadera.blogspot.com.es/2013/05/antiguos-sistemas-de-reproduccion-manual.html>

Fig. 2. González, A. (2013). *Sin título*. [Ilustración]. Recuperado de <http://tallerdetallaenmadera.blogspot.com.es/2013/05/antiguos-sistemas-de-reproduccion-manual.html>

Fig. 3. González, A. (2013). *Sin título*. [Ilustración]. Recuperado de <http://tallerdetallaenmadera.blogspot.com.es/2013/05/antiguos-sistemas-de-reproduccion-manual.html>

Fig. 4. González, A. (2011). *Sin título*. [Fotografías]. Recuperado de http://tallerdetallaenmadera.blogspot.com.es/2011/11/bt-7-sistemas-de-reproduccion_15.html

Fig. 5. Axial. (Sin fecha). *Sin título*. [Fotografía]. Recuperado de <http://www.nuevaferia.com.ar/p.asp?i=4483&n=Equipos-copiadores-de-formas-3D-Andreoni>

Fig. 6. a) Cts. (Sin fecha). *Silical 110 goma silicona plasmable*. [Fotografía]. Recuperado de <http://www.ctseurope.com/es/scheda-prodotto.php?id=624#>

b) Feroa. (Sin fecha). *Siliconas para moldes*. [Fotografía]. Recuperado de http://www.feroca.com/es/estano-condensacion/598-silastic-3481-base-ag-de-curado.html?search_query=81F&results=3

Fig. 7. a) Ferroca. (Sin fecha). *Agente de curado 81*. [Fotografía]. Recuperado de <http://www.feroca.com/es/complementos-silicona/209-ag-de-curado-s81.html>

b) Ferroca. (Sin fecha). *Agente de curado 81F*. [Fotografía]. Recuperado de <http://www.feroca.com/es/complementos-silicona/74-agente-de-curado-medio-para-siliconas-81-f.html>

c) Ferroca. (Sin fecha). *Agente de curado 81 VF*. [Fotografía]. Recuperado de <http://www.feroca.com/es/complementos-silicona/12-catalizador-silicona-muy-rapido-vf.html>

Fig. 8. Ferroca. (Sin fecha). *Aditivo tixotrópico para siliconas*. [Fotografía]. Recuperado de <http://www.feroca.com/es/complementos-silicona/25-thixo-additive-aditivo-tixotropico-para-siliconas.html>

Fig. 10. a) AutoDesSys. (2004). *Digitalizador de Microscribe*. [Fotografía]. Recuperado de ftp://ftp.formz.com/pub/formz/PDF_files/Documentation/Espanol/formZ_v4.0_Documentation/Microscribe%20Plugin.pdf

b) AutoDesSys. (2004). *Construcción de malla: contornos digitalizados y objeto malla*. [Fotografía e imagen]. Recuperado de ftp://ftp.formz.com/pub/formz/PDF_files/Documentation/Espanol/formZ_v4.0_Documentation/Microscribe%20Plugin.pdf

Fig. 11. a) Fort, R., Álvarez, M., Vázquez-Calvo, C. y Gómez-Villalba, L. (2013). *Perfilómetro (verde) midiendo una probeta de mármol. El equipo auxiliar (azul) se utiliza de sujeción y nivelación*. [Fotografía]. Recuperado de http://digital.csic.es/bitstream/10261/115409/1/CA_2012_4_198.pdf

b) Leica. (Sin fecha). *Sin título*. [Fotografía]. Recuperado de <http://www.leica-microsystems.com/es/productos/microscopios-opticos/industriales-y-de-materiales/microscopios-verticales/detalles/product/leica-dcm-3d/>

- Fig. 12.* Ikaslab. (2015). *Sin título*. [Fotografías]. Recuperado de http://wiki.ikaslab.org/index.php/Escaneo_3D_con_Digibuu_paso_a_paso
- Fig. 13.* Mañana-Borrazás, P., Rodríguez, A. y Blanco-Rotea, R. (2008). *Detalle de una diana de control y cómo se registra con el escáner*. [Imagen]. Recuperado de <http://digital.csic.es/bitstream/10261/15849/3/84.pdf>
- Fig. 14.* David 3D. (Sin fecha). *David sls-2*. [Imágenes]. Recuperado de <http://www.david-3d.com/es/support/david4/print-version#white-balance>
- Fig. 15. y 16* Factum Arte. (2013). *Sin título*. [Fotografías]. Recuperado de <https://vimeo.com/77507360>
- Fig. 17.* Factum Arte. (Sin fecha). *Sin título*. [Fotografías]. Recuperado de <http://www.factum-arte.com/pag/696/Lucida>
- Fig. 18.* [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2013).
- Fig. 19.* [Fotografía de Montaña Galán Caballero]. (Valencia. 2015).
- Fig. 20.* Stanco, F., Tanasi, D., Allegra, D., Milotta, F., Lamagna, G. & Monterosso, G. (2017). *Structure sensor clipped onto an iPad*. [Fotografía]. doi: 10.1117/1.JEI.26.1.011025
- Fig. 21.* Go Scan 3D. (Sin fecha). *Jarrón cerámico*. [Captura de pantalla]. Recuperado de <https://www.goscan3d.com/es/3d-models/vase-0>
- Fig. 22.* Agisoft. (2016). *Capturing photos*. [Ilustración]. Recuperado de http://www.agisoft.com/pdf/photoscan_1_2_en.pdf
- Fig. 27.* González, J. (2013). *Sin título*. [Fotografía]. Recuperado de <https://www.xataka.com/otros/sketchpad-cumple-50-anos-cuando-sutherland-sono-con-el-diseno-asistido-por-ordenador#comments>

Fig. 28. Kay, A/ History Computer. (1972). *Sin título*. [Ilustración]. Recuperado de http://www.vpri.org/pdf/hc_pers_comp_for_children.pdf

Fig. 29. History Computer. (Sin fecha). *Sin título*. [Fotografía]. Recuperado de <http://history-computer.com/ModernComputer/Personal/Dynabook.html>

Fig. 30. a) Velasco, J. (2011). *Sin título*. [Fotografía]. Recuperado de <https://hipertextual.com/2011/08/30-anos-del-ibm-pc>

b) Méndez, M. (2014). *Sin título*. [Fotografía]. Recuperado de <http://es.gizmodo.com/se-cumplen-30-anos-de-la-presentacion-del-primer-macint-1508020195>

Fig. 31. Arc Gis. (Sin fecha). *Sin título*. [Imagen]. Recuperado de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>

Fig. 32. a) Eiteljorg H., (1988). *In situ material from phase one. Perspective view*. [Imagen]. Recuperado de <http://csanet.org/inftech/cadbklt.html>

b) Eiteljorg H., (1988). *In situ material from phase one. Perspective view*. [Imagen]. Recuperado de <http://csanet.org/inftech/cadbklt.html>

Fig. 33. Ribbonsoft. (Sin fecha). *Tres pasos posibles para crear rápidamente un dibujo utilizando construcciones de apoyo y la capacidad de un sistema CAD para cambiar las entidades existentes*. [Imagen]. Recuperado de <https://www.ribbonsoft.com/doc/qcad/2.2/reference/es/tema04.html>

Fig. 34. Ribbonsoft. (Sin fecha). *Ventana principal de la aplicación de QCad*. [Imágen]. Recuperado de <https://www.ribbonsoft.com/doc/qcad/2.2/reference/es/tema06.html>

Fig. 35. Ribbonsoft. (Sin fecha). *Print Preview*. [Imagen]. Recuperado de <https://www.ribbonsoft.com/doc/qcad/2.2/reference/es/tema09.html>

Fig. 36. a) Solidworks. (Sin fecha). 3D CAD software allows you to thoroughly explore an assembly with explode, unexplode, and hide parts from views capabilities. [Imagen]. Recuperado de

http://www.solidworks.com/sw/docs/2Dand3D_2010_ENG_FINAL.pdf

b) Solidworks. (Sin fecha). 2D drawing views are automatically created from the 3D model and updated whenever the model is changed. [Imagen].

Recuperado de http://www.solidworks.com/sw/docs/2Dand3D_2010_ENG_FINAL.pdf

Fig. 37. Solidworks. (Sin fecha). With SolidWorks software you can automatically dimension 3D models according to industry standards. [Imagen]. Recuperado de http://www.solidworks.com/sw/docs/2Dand3D_2010_ENG_FINAL.pdf

Fig. 39. Aprendiendo Xna. (Sin fecha). Sin título. [Imagen]. Recuperado de <https://aprendiendoxna.wordpress.com/articulos/xna/sistema-de-coordenadas-3d/>

Fig. 44. Fernández Ruíz, M. (2011). Creación de un dado a partir de una operación booleanas de sustracción. [Imagen]. Recuperado de http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/12936/modelado_fernandez_2011_pp.pdf;jsessionid=EA85A669B542C513CB121F571973394F?sequence=1

Fig. 46. Ángeles, M. (2011). Modelado de escultura a base de “zspheres”. [Imágen]. Recuperado de

<https://polipapers.upv.es/index.php/var/article/view/4673/4807>

Fig. 47. Ángeles, M. (2011). Ejemplo de modelado con la herramienta “retopology” y su aplicación práctica en una escultura. [Imagen]. Recuperado de

<https://polipapers.upv.es/index.php/var/article/view/4673/4807> Soriano, A. *Cómo crear texturas tileables (seamless).* [Imagen]. Recuperado de https://www.youtube.com/watch?time_continue=361&v=dikn3E4hsw0

Fig. 52. Soriano, A. (2014). Sin título. [Captura de pantalla]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=dikn3E4hsw0>

Fig. 53. Textures.com. (Sin fecha). *Sin título*. [Captura de pantalla]. Recuperado de <http://www.textures.com/>

Fig. 54. 3D Luis Tutorials. (2010). *Sin título*. [Capturas de pantalla]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=PBFUbyWTb90>

Fig. 56. Luna A. (2012). *Ejemplo de varios tipos de luces IES en YafaRay*. [Imagen]. Recuperado de https://docs.google.com/document/d/1yHAPvBsAOgJFhFiZpWiheV8oJ1uEJt_jtGyyWH3rMjE/edit#heading=h.ipnpw4w66nvr

Fig. 57. Fong R. (2014). *Sin título*. [Imagen]. Recuperado de <http://www.ronald-fong.com/portfolio/rigging-for-animation-demo-reel/>

Fig. 58. a) Schröder P. (2000). *Example of subdivision for curves in the plane*. [Imagen]. Recuperado de <https://mrl.nyu.edu/publications/subdiv-course2000/coursenotes00.pdf>

b) Schröder P. (2000). *Example of subdivision for a surface*. [Imagen]. Recuperado de <https://mrl.nyu.edu/publications/subdiv-course2000/coursenotes00.pdf>

Fig. 59. Patrimonio Virtual. (2015). *Integración y soporte de opensubdiv en Blender*. [Imagen]. Recuperado de <http://www.patrimoniovirtual.com/2015/12/14/integracion-y-soporte-de-opensubdiv-en-blender/>

Fig. 60. De Rose, T., Kass M. & Truong T. (1998). *Recursive subdivision of a topologically complicated mesh*. [Imagen]. Recuperado de <http://graphics.pixar.com/library/Geri/paper.pdf>

Fig. 61. Tinkercad. (2016). *Sin título*. [Imagen]. Recuperado de <https://www.tinkercad.com/things/cpHjUUOoW8V-london-tower-bridge/>

Fig. 62. Customizer. (Sin fecha). *Screenshots*. [Imagen]. Recuperado de <https://www.thingiverse.com/app:22/screens>

Fig. 64. Sabeercad. (2013). *Sin título*. [Captura de pantalla]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=fHqolQwz93U>

Fig. 65. Martín, G. (2015). *Interface de Autodesk Maya con la pestaña Human IK desplegada*. [Imagen]. Recuperado de <http://produccioncientificaluz.org/index.php/opcion/article/view/20511/20422>

Fig. 66. Olachea, O. (2014). *Sin título*. [Imagen]. Recuperado de <http://www.paredro.com/6-buenas-opciones-de-programas-para-el-modelado-en-3d/>

Fig. 67. Espinel, J. C. (2016). *Creación de la pieza Samuel I*. [Imagen]. Recuperado de <http://eprints.ucm.es/38940/1/T37730.pdf>

Fig. 70. Iscar. (2016). *Sin título*. [Imagen]. Recuperado de <http://www.iscarnet.com/2016/02/uso-de-sketchup-patrimonio-arquitectonico/>

Fig. 71. Groma 2.0. (2012). *Proyección de pintura*. [Imagen]. Recuperado de <http://dibujoarqueologico3d.blogspot.com.es/2012/06/kinect-360-escaner-3d-al-alcance-de.html>

Fig. 77. García, E., Thezá, L., Marín, F. y Sepúlveda, R. (2013). *Sin título*. [Ilustraciones]. Recuperado de <https://es.slideshare.net/LESTHEZA/taladro-24585552>

Fig. 78. Aldabaldetrecu P. (2002). *Boceto de un torno de pedal y doble pértiga de Leonardo da Vinci, que no llegó a construirse por falta de medios (siglo XV)*. [Ilustración]. Recuperado de <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/1435-Evolucion-tecnica-de-la-maquina-herramienta-Resena-historica.html>

Fig. 79. Macias C. (2008). *Sin título*. [Ilustraciones]. Recuperado de <http://modeleriaind.blogspot.com.es/2008/11/este-torno-de-mecnico-se-construye-con.html>

Fig. 80. a) Aldabaldetrecu P. (2002). *Primera fresadora universal, fabricada por Joseph R. Brown en 1862*. [Imagen]. Recuperado de <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/1435-Evolucion-tecnica-de-la-maquina-herramienta-Resena-historica.html>

b) Aldabaldetrecu P. (2002). *Torno para cilindrar de Maudslay, que marcó una nueva era (1797)*. [Imagen]. Recuperado de <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/1435-Evolucion-tecnica-de-la-maquina-herramienta-Resena-historica.html>

Fig. 81. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2015).

Fig. 83. CustomPartNet. (2008). *Stereolithography (SLA)*. [Imagen]. Recuperado de <http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>

Fig. 84. Infante, R. (2012). *Esquema del proceso de SGC. Fuente: Instituto tecnológico de Aragón. Servicios de prototipado rápido, digitalización e ingeniería inversa*. [Imagen]. Recuperado de <https://tfmrimuned.wordpress.com/fotopolimerizacion-por-luz-ultravioleta-sgc/>

Fig. 85. Rocbor.net. (Sin fecha). *Lom*. [Imagen]. Recuperado de www.rocbor.net/Product/Ressources/NouvellesTechnologies/StereolithographieAndCo/Processeses/img/LOM_Principe_Small.png

Fig. 86. ProtoFast. (Sin fecha). *Tecnología FDM*. [Imagen]. Recuperado de <http://protofast.com.br/solucoes.html>

Fig. 87. Laser Prototypes Europe Ltd. (Sin fecha). *SelectiveLaser Sintering Process*. [Imagen]. Recuperado de <http://www.laserproto.com/services/selective-laser-sintering/selective-laser-sintering-process>

Fig. 88. 3D Natives. (2016). *Esquema del proceso de sinterizado directo de metal por láser (DMLS).* [Imagen]. Recuperado de <http://www.3dnatives.com/es/sinterizado-directo-de-metal-por-laser-les-explicamos-todo/>

Fig. 89. Truesdell K. (Sin fecha). *Sin título.* [Imagen]. Recuperado de <http://slideplayer.com/slide/1717008/>

Fig. 90. Espinel, J. C. (2016). *Archivo simple y curvado que va a ser transformado en .stl.* [Imagen]. Recuperado de <http://eprints.ucm.es/38940/1/T37730.pdf>

Fig. 91. R3ald. (Sin fecha). *Sin título.* [Imágenes]. Recuperado de <http://www.r3ald.com/que-es-un-fichero-stl>

Fig. 92. a) Factum Arte. (Sin fecha). *Detalle del fresado para la Reconstrucción del extremo oriental de la sala del trono de Ashurnasirpal II.* [Fotografía]. Recuperado de <http://www.factum-arte.com/pag/568/Fresado>

b) Factum Arte. (Sin fecha). *Detalle del fresado de Hereford Mappa Mundi.* [Fotografía]. Recuperado de <http://www.factum-arte.com/pag/568/Fresado>

Fig. 93. Factum Arte. (2016). *El robot Kuka de 7 ejes fresando un bloque de poliestireno de alta densidad.* [Fotografía]. Recuperado de <http://www.factum-arte.com/pag/826/Shezad-Dawood--br---i-Bustos-para-la-exposicion-Kalimpong---i->

Fig. 94. Fundación Telefónica. (2017). *IAAC en colaboración con Joris Laarman Lab. Mataerial, 2012.* [Fotografía]. Recuperado de https://espacio.fundaciontelefonica.com/wp-content/uploads/2017/02/guia_practica_3d.pdf

Fig. 95. 3D Systems. (Sin fecha). *Sin título.* [Fotografías]. Recuperado de <https://es.3dsystems.com/3d-printers/plastic#selective-laser-sintering-printers-sls>

Fig. 96. 3D Systems. (Sin fecha). *Sin título.* [Fotografías]. Recuperado de <https://es.3dsystems.com/3d-printers/plastic#selective-laser-sintering-printers-sls>

Fig. 97. Stratasys. (Sin fecha). *Sin título.* [Capturas de pantalla]. Recuperado de <http://www.stratasys.com/es/impresoras-3d/technologies/fdm-technology>

Fig. 99. CustomPartNet. (2008). *Three Dimensional Printing (3DP).* [Imagen]. Recuperado de <http://www.custompartnet.com/wu/3d-printing>

Fig. 100. CustomPartNet. (2008). *Inkjet Printing.* [Imagen]. Recuperado de <http://www.custompartnet.com/wu/ink-jet-printing>

Fig. 101. Del Fresno D. (2017). *Artes Gráficas: Integral 3D Printing y Estudios Durero presentan la Stratasys J750.* [Fotografías]. Recuperado de <http://moby3dick.blogspot.com.es/2017/01/artes-graficas-integral-3d-printing-y.html>

Fig. 102. Stratasys. (Sin fecha). *Sin título.* [Capturas de pantalla]. Recuperado de <http://www.stratasys.com/es/impresoras-3d/technologies/polyjet-technology>

Fig. 103. 3DLabs. (Sin fecha). *Sin título.* [Capturas de pantalla]. Recuperado de <http://3d-labs.de/mjm/?lang=en>

Fig. 104. Lixpen. (Sin fecha). *Lix 3D Printing pen.* [Fotografías]. Recuperado de <https://eu.lixpen.com/>

Fig. 105. 3Doodler. (2016). *New 3Doodler Create. Latest Version of the World's First 3D Printing Pen.* [Fotografías]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=zqgTGctbNLU>

Fig. 106. Lixpen. (2016). *Lixpen.* [Fotografías]. Recuperado de <https://www.instagram.com/lixpen/>

Fig. 107. Impresoras3D. (Sin fecha). *Sin título.* [Captura de pantalla]. Recuperado de <https://impresoras3d.com/>

Fig. 108. Espinel, J. C. (2016). *Medalla de plata Samuel I.* [Fotografía]. Recuperado de <http://eprints.ucm.es/38940/1/T37730.pdf>

Fig. 109. Impresoras3D. (Sin fecha). *Printakit. Kit de herramientas para impresión en 3D.* [Fotografía]. Recuperado de <https://impresoras3d.com/products/printakit-kit-de-herramientas-para-impresionen-3d>

Fig. 110. Retouch 3D. (Sin fecha). *Sin título.* [Imágenes]. Recuperado de <https://retouch3d.com/>

Fig. 111. Frick, L. (2014). *Sin título.* [Fotografía]. Recuperado de <http://www.machinedesign.com/3d-printing/how-smooth-3d-printed-parts>

Fig. 112. Griffiths, L. (2014). *Plastic 3D printed components after processing.* [Fotografía]. Recuperado de <http://www.tctmagazine.com/3D-printing-news/ogle-sets-guidelines-for-vibratory-bowls/>

Fig. 113. Retouch 3D. (Sin fecha). *Sin título.* [Fotografías]. Recuperado de <https://retouch3d.com/>

Fig. 114. Ramírez, M. (2015). *Stick para la aplicación directa de acetona. (Fuente makeraser.com).* [Fotografía]. Recuperado de <http://www.dima3d.com/tratamientos-superficiales-post-impresion-iii-tratamientos-quimicos-i/>

Fig. 115. Trimaker. (2017). *Sin título.* [Fotografías]. Recuperado de <https://trimaker.com/arquitectura-casas-impresas-en-3d/>

Fig. 116. Trimaker. (2017). *Sin título.* [Fotografía]. Recuperado de <https://trimaker.com/category/arquitectura/>

Fig. 117. Pack&Strat, (2017). *Sin título*. [Fotografía]. Recuperado de <https://www.rsd-engineering-3d.com/>

Fig. 118. Lodeiro, J. M. (2011). *Esquema de usos*. [Esquema]. Recuperado de <http://es.calameo.com/read/0000753358b142b1c934c>

Fig. 119. Lodeiro, J. M. (2011). *Esquema de métodos*. [Esquema]. Recuperado de <http://es.calameo.com/read/0000753358b142b1c934c>

Fig. 120. National Geographic. (2012). *El hombre de Piltdown*. [Fotografía]. Recuperado de http://www.nationalgeographic.com.es/historia/actualidad/el-hombre-de-piltdown-uno-de-los-mayores-fraudes-cientificos_6879/3

Fig. 121. Abc.es. (2012). *Dawson, con el famoso cráneo*. [Fotografía]. Recuperado de <http://www.abc.es/ciencia/20121213/abci-hombre-piltdown-cien-anos-201212122007.html>

Fig. 122. Harris, T. (1987). *Clay with flint*. [Imagen]. Recuperado de http://proceedings.caaconference.org/files/1987/16_Harris_CAA_1987.pdf

Fig. 123. Arcusa, H., Rojo, M. A., Royo J. I., Tejedor, C., García Martínez, I. y Garrido, R. (2016). *La fotogrametría como alternativa al registro de materiales arqueológicos: Su aplicación en la cueva de Els Trocs y Valmayor XI*. [Imágenes]. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/304581921_La_fotogrametria_como_alternativa_al_registro_de_materiales_arqueologicos_su_aplicacion_en_la_cueva_de_Els_Trocs_y_Valmayor_XI

Fig. 124. Sánchez Climent A. y Cerdeño M. L. (2014). *Recipiente cerámico procedente del poblado de Segontia Lanka (Langa de Duero, Soria)*. (Dibujo: Museo Numantino). [Imagen]. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5210208>

Fig. 125. a) Williams, N. & Williams, G./ Tate. *Sin título*. [Fotografía]. Recuperado de <http://www.tate.org.uk/art/artworks/gabo-construction-in-space-crystal-t06978>

b) Williams, N. *Probe data information for Construction in Space 'Crystal'*. [Imagen]. Recuperado de <http://www.tate.org.uk/research/publications/tate-papers/08/tate-sculpture-replica-project>

c) y d) Williams, N. *Construction in Space 'Crystal' coloured to show the different sections from which this sculpture has been constructed*. [Imagen]. Recuperado de <http://www.tate.org.uk/research/publications/tate-papers/08/tate-sculpture-replica-project>

Fig. 126. 2000 Stanford Computer Graphics Laboratory. (Sin fecha). *Sin título*. [Imágenes]. Recuperado de <https://graphics.stanford.edu/projects/mich/color-david/color-david.html>

Fig. 127. 2000 Stanford Computer Graphics Laboratory. (Sin fecha). *Sin título*. [Imágenes]. Recuperado de <https://graphics.stanford.edu/projects/mich/color-david/color-david.html>

Fig. 128. 2000 Stanford Computer Graphics Laboratory. (Sin fecha). *Sin título*. [Imágenes]. Recuperado de <https://graphics.stanford.edu/projects/mich/head-of-david/head-of-david.html#The 0.29mm model>

Fig. 129. Cano, P., Lamolda, F., Torres, J. C. y Villafranca, M. M. (2010). *álculo de diferencias entre volúmenes después de actuaciones de limpieza y león 4 ya restaurado*. [Imágenes]. Recuperado de <https://doi.org/10.4995/var.2010.4695>

Fig. 130. Koroso, I. (2013). *Imagen del modelo tridimensional del interior de la catedral realizado por fotogrametría*. [Imagen]. Recuperado de <http://www.jcyl.es/web/jcyl/binarios/613/71/actasAR&PA2012.pdf?>

Fig. 131. Koroso, I. (2013). *Formularios de datos con la información relativa a la restauración artística del pórtico.* [Imagen]. Recuperado de <http://www.jcyl.es/web/jcyl/binarios/613/71/actasAR&PA2012.pdf?>

Fig. 132. Koroso, I. (2013). *Detalle del modelo tridimensional de las excavaciones.* [Imagen]. Recuperado de <http://www.jcyl.es/web/jcyl/binarios/613/71/actasAR&PA2012.pdf?>

Fig. 133. 3D-Coform. (Sin fecha). *Sin título.* [Captura de pantalla]. Recuperado de <http://www.3d-coform.eu/index.php/dissemination/exhibitions>

Fig. 134. 3D-Coform. (Sin fecha). *Sin título.* [Captura de pantalla]. Recuperado de <http://3d-coform.eu/x3dom/index.html>

Fig. 135. Catalhoyuk. (2010). *History of the Excavations.* [Imagen]. Recuperado de <http://www.catalhoyuk.com/project/history>

Fig. 136. Catalhoyuk. (Sin fecha), *3D model of the entranceway to a house, showing the position of the oven below the ladder. Model created by Grant Cox.* [Imágen]. Recuperado de <http://www.catalhoyuk.com/site/architecture>

Fig. 137. Forte, M. (2014). *Image modeling of the building 89 at Çatalhöyük.* [Imagen]. Recuperado de https://www.academia.edu/5719952/3D_Modeling_in_Archaeology_and_Cultural_Heritage_Theory_and_Best_Practices?auto=download

Fig. 138. Forte, M. (2014). *Building 77 at Çatalhöyük: The teleimmersive session shows the spatial integration of shape files (layers, units and artifacts) in the 3D model recorded by laser scanning.* [Imagen]. Recuperado de https://www.academia.edu/5719952/3D_Modeling_in_Archaeology_and_Cultural_Heritage_Theory_and_Best_Practices?auto=download

Fig. 139. Van Riel, S. (2016). *Comparison of dense cloud (A), wireframe mesh (B), solid mesh (C) and textured mesh (D) for a lower quality model (left) and a higher*

quality model (right) of the section. [Imágenes]. Recuperado de <http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=8876753&fileId=8876759>

Fig. 140. Dell Unto, N. (2014). *This image shows the investigation area that was selected in 2010 to test the efficiency of the Computer Vision techniques during an archaeological excavation in Uppåkra.* [Imágenes]. Recuperado de https://www.academia.edu/5719952/3D_Modeling_in_Archaeology_and_Cultural_Heritage_Theory_and_Best_Practices?auto=download

Fig. 141. Dell Unto, N. (2014). *This image shows two models of the excavation that were created at different times during the investigation camagne.* [Imágenes]. Recuperado de https://www.academia.edu/5719952/3D_Modeling_in_Archaeology_and_Cultural_Heritage_Theory_and_Best_Practices?auto=download

Fig. 142. Seoane, J. A y Hernández Ibáñez, L. A. (2012). *Ventana de gestión de capas y terreno 3D con modelo de nube de puntos e iconos 3D.* [Imagen]. Recuperado de <http://polipapers.upv.es/index.php/var/article/view/4508/4657>

Fig. 143. Molina, J. y Jordá, J. F. (2016). *La Estructura 18.* [Imágenes]. Recuperado de doi: <https://doi.org/10.4995/var.2016.5866>

Fig. 144. Jiménez, J. G., García, M., Jorge, M. y Melero F. J. (2012). *Digitalización de Patrimonio Mueble y Digitalización de patrimonio inmueble con escáner Faro LS.* [Imagen]. doi: <https://doi.org/10.4995/var.2012.4386>

Fig. 145. y 146. Morpho Source. (2015). *Sin título.* [Captura de pantalla]. Recuperado de http://morphosource.org/Detail/MediaDetail/Show/media_id/7300

Fig. 147. a 154. [Fotografías de Factum Arte].

Fig. 155. a 157. Factum Arte. (Sin fecha). *Sin título*. [Imágenes]. Recuperado de <http://www.factum-arte.com/pag/273/El-claustro-romanico-de-la-Catedral-de-Tudela>

Fig. 158. Photo Iconem. (2016). *Quatre vues générales des quatres sites de l'expositon "Sites éternels": Khorsabad (Irak), Palmyre, la Grande Mosquée des Omeyyades, le Krak des Chevaliers (Syrie)*. [Fotografías]. Recuperado de <https://www.google.com/culturalinstitute/beta/exhibit/IQLCquWsLmG7Ig>

Fig. 159. Grand Palais. (2016). *Sin título*. [Captura de pantalla]. Recuperado de https://www.youtube.com/watch?time_continue=8&v=IDyA0iA4zWk

Fig. 160. a) Rex Features. (2014). *Syria's landmark fortress of Krak des Chevaliers*. [Imagen]. Recuperado de <http://www.independent.co.uk/news/world/middle-east/syria-conflict-clashes-between-rebels-and-army-edge-near-to-iconic-crusader-castle-krak-des-9105403.html>

b) Rusia Insight. (2015). *Sin título*. [Captura de pantalla]. Recuperado de Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=wE7aGVSpjfo>

Fig. 161. Grand Palais. (2016). *Sin título*. [Captura de pantalla]. Recuperado de https://www.youtube.com/watch?time_continue=21&v=JrTJ42keF0k

Fig. 162. Photo Iconem & DGAM. (2016). *Sin título*. [Captura de pantalla]. Recuperado de <https://www.google.com/culturalinstitute/beta/exhibit/IQLCquWsLmG7Ig>

Fig. 163. Iconem. (2016). *Sites éternels. Vue aérienne du complexe architectural de Khorsabad, dans le Nord de l'Irak*. [Imagen]. Recuperado de <https://www.google.com/culturalinstitute/beta/exhibit/IQLCquWsLmG7Ig>

Fig. 164. Al-kheder, S., Al-shawabkeh, Y. & Haala, N. (2009). *An example of two scans registration at Amra*. [Imagen]. doi: 10.1016/j.jas.2008.10.009

Fig. 165. Al-kheder, S., Al-shawabkeh, Y. & Haala, N. (2009). *3D textured model using the master image, the occluded parts which do not appear in the master image have zero texture values. These parts will be textured from the other images.* [Imagen]. doi: 10.1016/j.jas.2008.10.009

Fig. 166. Gómez Robles L., Quirosa, V. y Fernández Ruiz, J. A. (2009). *Planimetría con niveles de fidelidad e Imagen completa del modelo digital de Puerta Real.* [Imágenes]. Recuperado de pendientedemigracion.ucm.es/info/arqueoweb/pdf/12/robles.pdf

Fig. 167. Saleh, M. (2010). *Virtual Restoration of a cartonnage mask 18th Dynasty (1400 BC).* [Fotografía e imagen]. Recuperado de <http://www.arqueologiavirtual.com/>

Fig. 168. WordPress.com. (Sin fecha). *Schooter y K38 Bandada.* [Imágenes]. Recuperado de <https://elartedigital.wordpress.com/historia/artistas/george-nees/>

Fig. 169. a) Rockstar, D. (Sin fecha). *Skyscrapers.* [Imagen]. Recuperado de <https://www.pinterest.com.mx/pin/132363676518849069/>

b) Kuskov, A. (2012). *Time Machine.* [Imagen]. Recuperado de <https://www.behance.net/gallery/4562407/Time-Machine>

c) Reeh, J. (2012). *Creative miniworld.* [Imagen]. Recuperado de <https://www.behance.net/gallery/4817717/Creative-miniworld>

d) Mecanique Generale Team. (2012). *Ballantine's.* [Imagen]. Recuperado de <https://www.behance.net/gallery/508682/Ballantines>

Fig. 170. a) Kanh, S. (2014). *Periode des Attitudes Passionelles.* [Fotografía]. Recuperado de <https://www.sophiekah.net/o1qy4aqliptjn02p5ldzi0wap03heq>

b) Kanh, S. (2013). *Torso of a Woman (Shards).* [Fotografía]. Recuperado de <https://www.sophiekah.net/q8sktpypsuf63x9iw6i8sdb5l4dlhz>

c) Kanh, S. (2012). *Laura*. [Fotografía]. Recuperado de <https://www.sophiekahh.net/v3nvk6u45uric5bo5arrbr63tcrixu>

Fig. 171. a) Guiraud, M. (2012). *Jaguar*. [Fotografía]. Recuperado de http://www.arte-online.net/Agenda/Exposiciones_Muestras/Premio_Itau_Cultural_a_las_Artes_Visuales_en_el_MACLA

b) Guiraud, M. (2014). *Mano*. [Fotografía]. Recuperado de bbaainvestiga.wordpress.com

Fig. 172. Dupont, R. (2008). *Sin título 8*. [Fotografía]. Recuperado de <http://galeriemax.com/artist/richard-dupont>

Fig. 173. Fundación Telefónica / Van der Kley, M. (2017). *Michiel van der Kley. Project EGG, 2014*. [Fotografía]. Recuperado de https://espacio.fundaciontelefonica.com/wp-content/uploads/2017/02/guia_practica_3d.pdf

Fig. 174. Factum Arte. (2009). *Sin título*. [Fotografías]. Recuperado de <http://www.factum-arte.com/pag/373/Greyman-cries-Shaman-Dies-Billowing-Smoke-Beauty-Evoked>

Fig. 175. Coon, C., Pretzel, B., Lomax, T. & Strlič, M. (2016). *Images of the RP artwork “Out of the Cauldron” designed by Tom Lomax produced with the most common RP Technologies*. [Fotografía]. doi: 10.1186/s40494-016-0097-y

Fig. 176. Lautenschlager, S. (2016). *Digital representation of the left jugal of Erlikosaurus andrewsi from left to right as originally preserved, with in-filled breaks and fully restored element*. [Imágenes]. doi: 10.1098/rsos.160342

Fig. 177. Lautenschlager, S. (2016). *Reflection of elements*. [Imágenes]. doi: 10.1098/rsos.160342

Fig. 178. Lautenschlager, S. (2016). *Repositioning of elements using landmarks.* [Imágenes]. doi: 10.1098/rsos.160342

Fig. 179. Lautenschlager, S. (2016). *Manual repositioning of elements.* [Imágenes]. doi: 10.1098/rsos.160342

Fig. 180. Lautenschlager, S. (2016). *Duplication of elements.* [Imágenes]. doi: 10.1098/rsos.160342

Fig. 181. Lautenschlager, S. (2016). *Retrodeformation.* [Imágenes]. doi: 10.1098/rsos.160342

Fig. 182. Syson, L. & Cafá, V. (2014). *Tullio Lombardo. Adam, ca. 1490–95.* [Fotografía]. doi: <https://doi.org/10.1086/680047>

Fig. 183. Riccardelli, C. (2014). *Map of the Vélez Blanco Patio indicating the locations of the fragments y Photographic documentation.* [Fotografías]. doi: <https://doi.org/10.1086/680027>

Fig. 184. Street, R. & CAE Associates. (2014). *Results of Studies 2 and 3.* [Imagen]. doi: <https://doi.org/10.1086/680027>

Fig. 185. a) Street, R. (2014). *Full-scale model of Adam's torso being fabricated in dense polyurethane foam by a computer numerically controlled (CNC) milling machine.* [Fotografía]. doi: <https://doi.org/10.1086/680027>

b) Riccardelli, C., Morris, M., Wheeler, G., Soultanian, J., Becker, L. & Street, R. (2014). *The full-scale milled model of Adam's torso suspended over the left leg during armature development.* [Fotografía]. doi: <https://doi.org/10.1086/680027>

Fig. 186 Riccardelli, C., Morris, M., Wheeler, G., Soultanian, J., Becker, L. & Street, R. (2014). *Adam during the dry run.* [Fotografía]. doi: <https://doi.org/10.1086/680027>

Fig. 187. Riccardelli, C., Morris, M., Wheeler, G., Soultanian, J., Becker, L. & Street, R. (2014). *Adam after cleaning, with fills completed*. [Fotografía]. doi: <https://doi.org/10.1086/680027>

Fig. 188. Scopigno R. (2011). *The digital assembly of the Madonna of Pietranico from the digitized fragments (image above) and the design of the two supporting elements (head and bust) created as digital shapes and then constructed using rapid prototyping for the real assembly*. [Imagen]. doi: <https://doi.org/10.4995/var.2012.4537>

Fig. 189. Scopigno, R., Cignoni, P., Pietroni, N., Callieri, M. & Dellepiane, M. (2015). *The supporting elements produced to reassemble the Pietranico Madonna*. [Imagen y fotografía]. doi: <https://doi.org/10.1111/cgf.12781>

Fig. 190. a) Bevilacqua, M. (2011). *Sin título*. [Captura de pantalla]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=2dquqRwkpqk>

b) Scopigno R. (2011). *A snapshot of MeshLab during the repainting of the head section of the Madonna*. [Imagen]. doi: <https://doi.org/10.4995/var.2012.4537>

Fig. 191. Cocco, P. (2011). *La Madonna di Pietranico: genesi di un restauro complesso*. [Fotografía]. Recuperado de http://www.beniculturali.it/mibac/export/MiBAC/sito-MiBAC/Contenuti/MibacUnif/Comunicati/visualizza_asset.html_1323294850.html

Fig. 192. Fundación Medinaceli. (2015). *Fragmentos de la escultura “San Juan Bautista niño” en 1972*. [Fotografía]. Recuperado de <http://www.rtve.es/fotogalerias/san-juanito-escultura-miguel-angel-espana/152698/proceso-reconstitucion-del-san-juanito/5>

Fig. 193. Fundación Medinaceli. (2015). *Imagen de la cabeza de la escultura*. [Fotografía]. Recuperado de <http://www.rtve.es/fotogalerias/san-juanito-escultura-miguel-angel-espana/152698/proceso-reconstitucion-del-san-juanito/5>

Fig. 194. Fundación Medinaceli. (2015). *Secuencia de imágenes de San Juanito*. [Fotografías e imagen]. Recuperado de <http://www.rtve.es/fotogalerias/san-juanito-escultura-miguel-angel-espana/152698/proceso-reconstitucion-del-san-juanito/5>

Fig. 195. Paleorama. (2014). *Fragmento de la coraza del thoracatus de Los Bañales y Detalle del motivo central*. [Fotografías]. doi: <http://dx.doi.org/10.14201/zephyrus201473197216>

Fig. 196. Paleorama/Los Bañales. (2015). *Relación de fragmentos recuperados de la estatua imperial de Los Bañales*. [Imagen]. doi: <https://doi.org/10.4995/var.2015.4379>

Fig. 197. a) Paleorama/Los Bañales. (2015). *Reconstrucción Fotogramétrica e integración de los restos del thoracatus*. [Imagen]. doi: <https://doi.org/10.4995/var.2015.4379>

b) Paleorama/Proyecto Bañales. (2015). *Integración de los fragmentos dentro de la hipótesis formal total*. [Imagen]. doi: <https://doi.org/10.4995/var.2015.4379>

Fig. 198. a) Fratelli Alinari. (1938). *The Biscari head*. [Fotografía]. Recuperado de <http://electronicimaging.spiedigitallibrary.org/>

b) Stanco, F., Tanasi, D., Allegra, D., Milotta, F. L. M., Lamagna, G. & Monterosso, G. (2017). *The torso from Leontinoi*. [Fotografía]. Recuperado de <http://electronicimaging.spiedigitallibrary.org/>

Fig. 199. Stanco, F., Tanasi, D., Allegra, D., Milotta, F. L. M., Lamagna, G. & Monterosso, G. (2017). *Phases of digital measuring with Meshlab, diameters of head and torso*. [Imágenes]. Recuperado de <http://electronicimaging.spiedigitallibrary.org/>

Fig. 200. Stanco, F., Tanasi, D., Allegra, D., Milotta, F. L. M., Lamagna, G. & Monterosso, G. (2017). *Manual alignment of the 3-D models of the head and the*

torso in Blender. [Imágenes]. Recuperado de <http://electronicimaging.spiedigitallibrary.org/>

Fig. 201. Tsiafaki, D., Koutsoudis, A., Arnaoutoglou, F. & Michailidou, N. (2016). *The 3D digital replicas (vertex paint) of the nine sherds organised into two groups based on their contiguity.* [Imagen]. doi: <http://dx.doi.org/10.4995/var.2016.5910>

Fig. 202. Tsiafaki, D., Koutsoudis, A., Arnaoutoglou, F. & Michailidou, N. (2016). *Spatial distribution of sherds: a) Group 1; b) Group 2.* [Imágenes]. doi: <http://dx.doi.org/10.4995/var.2016.5910>

Fig. 203. Tsiafaki, D., Koutsoudis, A., Arnaoutoglou, F. & Michailidou, N. (2016). *Visualisation of the synthetic part of the vessel's body: a) Aligned with the two groups of sherds; b) After the application of the Boolean 3D mesh operations.* [Imágenes]. doi: <http://dx.doi.org/10.4995/var.2016.5910>

Fig. 204. Tsiafaki, D., Koutsoudis, A., Arnaoutoglou, F. & Michailidou, N. (2016). *Different viewpoint renderings of the virtually completed kantharos.* [Imagen]. doi: <http://dx.doi.org/10.4995/var.2016.5910>

Fig. 205. Tejerina, D., Esclapés, F. J., Pasíes, T. y Melchor, J. M. (2011). *a) Proceso de documentación de la pieza; b) modelo 3D de la pieza una vez ha sido digitalizada; c) Integración del modelo 3D procedente del escáner y reconstrucción volumétrica.* [Fotografía e imágenes]. Recuperado de http://www.academia.edu/22352378/La_restauraci%C3%B3n_virtual_de_piezas_arqueol%C3%B3gicas_a_partir_de_datos_procedentes_de_esc%C3%A1ner_3D_reconstrucci%C3%B3n_volum%C3%A9trica_de_una_jarrita_isl%C3%A1mica_del_Museo_Arqueol%C3%B3gico_Municipal_de_la_Plana_Baixa_-_Burriana_Castell%C3%B3n

Fig. 206. Tejerina, D., Esclapés, F. J., Pasíes, T. y Melchor, J. M. (2011). *Modelo 3D tras la restauración digital.* [Imágenes]. Recuperado de http://www.academia.edu/22352378/La_restauraci%C3%B3n_virtual_de_piezas_arqueol%C3%B3gicas_a_partir_de_datos_procedentes_de_esc%C3%A1ner_3D_rec

onstrucci%C3%B3n_volum%C3%A9trica_de_una_jarrita_isl%C3%A1mica_del_
Museo_Arqueol%C3%B3gico_Municipal_de_la_Plana_Baixa_-
Burriana_Castell%C3%B3n

Fig. 207. Grande, A. y Rodríguez Hidalgo, J. M. (2011). *Ciudad de Itálica en el siglo II. Eje oeste/este*. [Imagen]. Recuperado de <https://polipapers.upv.es/index.php/var/article/view/4559/4693>

Fig. 208. Grande, A. y Rodríguez Hidalgo, J. M. (2011). *Vistas del estado actual del Mosaico de Tellus de la Casa de los Pájaros de Itálica (Santiponce) y restauración digital del mismo. Integración digital en la laguna central el emblema robado en la década de los ochenta*. [Fotografía e imagen]. Recuperado de <https://polipapers.upv.es/index.php/var/article/view/4559/4693>

Fig. 209. Grande, A. y Rodríguez Hidalgo, J. M. (2011). *Ejemplos de modelos de pintura mural histórica restaurados virtualmente*. [Imágenes]. Recuperado de <https://polipapers.upv.es/index.php/var/article/view/4559/4693>

Fig. 210. Grande, A. y Rodríguez Hidalgo, J. M. (2011). *Reproducción de la obra “Pollice Verso” y su integración en escena virtual 3D que ilustre a los gladiadores de un anfiteatro romano y Reproducción de la obra “At the antiquarian” y su integración en escena virtual 3D que ilustre una tabernae romana*. [Imágenes]. Recuperado de <https://polipapers.upv.es/index.php/var/article/view/4559/4693>

Fig. 211. Pinto, F., Guerrero, J. M. y Angulo, R. (2012). *Secuencia de captura dimensional mediante procesos fotogramétricos de escaneado digital*. [Fotografía e imagen]. doi: <https://doi.org/10.4995/var.2012.4442>

Fig. 212. Pinto, F., Guerrero, J. M. y Angulo, R. (2012). *Encaje de los fragmentos escaneados*. [Imagen]. doi: <https://doi.org/10.4995/var.2012.4442>

Fig. 213. Pinto, F., Guerrero, J. M. y Angulo, R. (2012). Fig. 187. a) *Modelo 3D donde se ubican las piezas documentadas*; b) *Volcado en proyecciones planas de*

un módulo del scaenae frons; c) Modelo 3D de un fragmento de la anastilosis.
[Imagen]. doi: <https://doi.org/10.4995/var.2012.4442>

Fig. 214. Laumain, X., López Sabater, A., Rios, J. y Huerta, C. (2012). *Ejemplo de restitución de zócalo.* [Fotografía e imagen]. doi: <https://doi.org/10.4995/var.2012.4526>

Fig. 215. Laumain, X., López Sabater, A., Rios, J. y Huerta, C. (2012). *Estado actual de la torre y Restitución virtual de la parte superior de la torre miramar.* [Fotografía e imagen]. doi: <https://doi.org/10.4995/var.2012.4526>

Fig. 216. Sundstedt, V., Chalmers, A. & Martínez, P. (2004). *Computer reconstruction and a view of Kalabsha as it appears today y (a) View of the courtyard today and (b) how it may have appeared in 30BC.* [Imágenes y fotografías]. doi: 10.1145/1029949.1029970

Fig. 217. Colmenero, A. y Rodríguez Cao, C. (2012). *Reconstrucción virtual que representaría una de las estancias decoradas e Hipótesis reconstructiva del interior del mitreo.* [Imágenes]. doi: <https://doi.org/10.4995/var.2012.4536>

Fig. 218. Lautenschlager, S., Witmer, L. M., Altangerel, P., Zanno, L. E. & Rayfield, E. J. (2014). *Comparación entre un cráneo original de Erlikosaurus andrewsi y su restauración digital.* [Imágenes]. Recuperado de <http://www.elmundo.es/blogs/elmundo/blogosaurio/2014/11/07/restauradores-digitales.html>

Fig. 219. Lautenschlager, S., Witmer, L. M., Altangerel, P., Zanno, L. E. & Rayfield, E. J. (2014). *Restauración digital de un cráneo.* [Imágenes]. Recuperado de <http://www.elmundo.es/blogs/elmundo/blogosaurio/2014/11/07/restauradores-digitales.html>

Fig. 220. Afp. (2015). *En Afganistán se debaten entre destinar fondos para reconstruir los budas, y así generar ingresos por el turismo en la zona, o dejar el sitio devastado como recuerdo del vandalismo del Talibán.* [Fotografía].

Recuperado de
http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/03/150312_cultura_hombre_destruye_budas_bamiyan_egn

Fig. 221. Shafayee, K. (2015). Imagen proyectada de la estatua de Buda en Bamiyán destruida por los talibán. [Fotografía]. Recuperado de
<http://www.elmundo.es/cultura/2015/06/15/557f001aca4741607b8b45a6.html>

Fig. 222. Peral, R., Sagasti, D., & Sillaurren, S. (2005). Interactive 3D application for studying projectors viewing the 3D model of the portico with three parallel projectors and their light beams y Conducting the validation test of the interactive adjusting application. [Imagen y fotografía]. Recuperado de
<https://pdfs.semanticscholar.org/03ee/e87b9e6e7a0047c0f57f6554cedacd9e5a60.pdf>

Fig. 223. Museo dell'Ara Pacis. (2014). Una immagine dell'evento I colori dell'Ara Pacis. [Fotografía]. Recuperado de
<http://disegnarecon.univaq.it/ojs/index.php/disegnarecon/article/download/37/32>

Fig. 224. a) Williams, N. (2007). Naum Gabo. Constructed Head No.2 (conceived c.1916). Galvanised iron, originally painted with yellow ochre, height 45 cm. [Fotografía]. Recuperado de
<http://www.tate.org.uk/research/publications/tate-papers/08/naum-gabo-and-the-quandaries-of-the-replica>

b) Williams, N. (2007). Naum Gabo. Constructed Head No.2 (conceived c.1916, this version probably executed c.1923). Ivory Rhodoid, height 43 cm. [Fotografía]. Recuperado de
<http://www.tate.org.uk/research/publications/tate-papers/08/naum-gabo-and-the-quandaries-of-the-replica>

c) Williams, N. & Williams, G. (Sin fecha). The Work of Naum Gabo. [Fotografía]. Recuperado de
<http://www.tate.org.uk/art/artworks/gabo-head-no-2-t01520>

Fig. 225. Dacs. (2007). *El Lissitzky. Prounenraum 1923, reconstruction 1971. Painted Wood. 320 x 364 x 364 cm.* [Fotografía]. Recuperado de <http://www.tate.org.uk/research/publications/tate-papers/08/replicas-and-reconstructions-in-twentieth-century-art>

Fig. 226. Moholy-Nagy, H. / DACS. (2007). *László Moholy-Nagy. Light Prop for an Electric Stage.* [Fotografía]. Recuperado de <http://www.tate.org.uk/research/publications/tate-papers/08/replicas-of-laszlo-moholy-nagys-light-prop-busch-reisinger-museum-and-harvard-university-art-museums>

Fig. 227. Moholy-Nagy, H./DACs. (2007). *László Moholy-Nagy. Licht-Raum Modulator. 1922/1930, replica 1970. Metal, wood, glass, motor. 201.7 x 78.8 x 69.7 cm.* [Fotografía]. Recuperado de <http://www.tate.org.uk/research/publications/tate-papers/08/replicas-and-reconstructions-in-twentieth-century-art>

Fig. 228. Permuy, I. (2014). *El montaje de Terracota Navy, en el Centro Cultural de la Villa.* [Fotografía]. Recuperado de <http://www.abc.es/madrid/20140402/abci-prorroga-terracota-army-201404021326.html>

Fig. 229. a) Musee du Louvre. (Sin fecha). *Victory of Samothrace.* [Fotografía]. Recuperado de <https://www.boutiquesdemusees.fr/en/shops/musee-du-louvre/victory-of-samothrace/8588.html>

b) Musee du Louvre. (Sin fecha). *Nefertiti's daughter.* [Fotografía]. Recuperado de <https://www.boutiquesdemusees.fr/en/shops/musee-du-louvre/nefertitis-daughter/662.html>

c) Musee du Louvre. (Sin fecha). *The Borghese Gladiator.* [Fotografía]. Recuperado de <https://www.boutiquesdemusees.fr/en/shops/musee-du-louvre/the-borghese-gladiator/4894.html>

Fig. 230. a) British Museum. (Sin fecha). Antinous replica (British Museum exclusive). [Fotografía]. Recuperado de <http://www.britishmuseumshoponline.org/invt/cmcr60870>

b) British Museum. (Sin fecha). *Rosetta Stone plaque (British Museum exclusive).* [Fotografía]. Recuperado de <http://www.britishmuseumshoponline.org/invt/cmcr90850>

Fig. 231. Real Academia de Bellas Artes de San Fernando. (Sin fecha). Sin título. [Fotografía]. Recuperado de <http://www.realacademiabellasartessanfernando.com/es/taller-de-vaciados/historia>

Fig. 232. IAPH / José Manuel Santos Madrid. (Sin fecha). El Giraldillo en el Taller de restauración de metales del IAPH. Ana Bouzas, restauradora del IAPH. [Fotografía]. Recuperado de http://www.iaph.es/export/sites/default/galerias/documentacion_migracion/Cuaderno/1253548658356_giraldillo_romanfernandez.pdf

Fig. 233. CM DIXON / HERITAGE / GTRES. (2013). Piedra de Rosetta. [Fotografía]. Recuperado de http://www.nationalgeographic.com.es/articulo/historia/actualidad/8462/piedra_rosetta_descubrio_hace_214_anos.html

Fig. 234. Ferrier, M. (2016). Production of cave art facsimile at Atelier des Fac-Similés du Périgord, Montignac-Lascaux, France. [Fotografía]. Recuperado de <http://www.afsp-perigord.fr/wp-content/uploads/2016/05/merged.pdf>

Fig. 235. Soriano, T. (2014). Un grupo de turistas observa la réplica de la cueva de Altamira en Santillana del Mar. [Fotografía]. Recuperado de http://sociedad.elpais.com/sociedad/2014/03/07/actualidad/1394222230_387695.html

Fig. 236. Madarieta, A. (2013). *Interior del Bizkaiko Arkeologi. Museoa. Bilbao. Bizkaia.* [Fotografía]. Recuperado de <http://www.jcyl.es/web/jcyl/binarios/613/71/actasAR&PA2012.pdf?>

Fig. 237. Factum Arte. (s.f.). *Sección del facsímil definitivo.* [Fotografía]. Recuperado de <http://www.factum-arte.com/pag/289/-p-Facs-iacute-mil-de-una-secci-oacute-n-de-la-c-aacute-mara-mortuoria-de-la-tumba-de-SETI-I--p-.b>

Fig. 238. Factum Arte. (s.f.). *Sin título.* [Fotografía]. Recuperado de <http://www.factum-arte.com/pag/289/-p-Facs-iacute-mil-de-una-secci-oacute-n-de> <http://www.factum-arte.com/pag/607/Exhibition-about-the-facsimile-of-Tutankhamun-apos-s-tomb>

Fig. 239. Bilboko Berreginen Museoa, Museo Reproducciones Bilbao. (Sin fecha). *Sin título.* [Fotografía]. Recuperado de <http://www.bilbokoberreginenmuseoa.eus/es/educacion/escuela-de-dibujo/turnos-y-horarios>

Fig. 240. Goal-Tech. (Sin fecha). *Usando moldes de yeso de los huesos seleccionados, en lugar de los fosiles, Sayers y Holland comenzaron la exploración. Sayers utilizo el escáner 3D Geomagic Capture para el trabajo.* [Fotografías]. Recuperado de <http://goal-tech.com.mx/es/casos-de-estudio/escaneo-e-impresion-3d-proporciona-la-primera-reconstruccion-en-3d-de-una-nueva-especie-de-dinosaurio/>

Fig. 241. 3D Cad Portal. (2015). *Sin título.* [Fotografía]. Recuperado de <http://www.3dcadportal.com/el-escaneo-e-impresion-3d-permiten-la-primera-reconstruccion-de-una-nueva-especie-de-dinosaurio.html>

Fig. 242. Factum Foundation. (Sin fecha). *Sin título.* [Fotografías]. Recuperado de <http://www.factumfoundation.org/pag/25/>

Fig. 243. Factum Foundation. (Sin fecha). *Sin título.* [Fotografía]. Recuperado de <http://www.factumfoundation.org/pag/209/Tutankhamun-apos-s-South-Wall>

Fig. 244. a) Factum Foundation. (Sin fecha). Howard Carter's photograph of the missing fragment of the South wall. [Fotografía]. Recuperado de <http://www.factumfoundation.org/pag/209/Tutankhamun-apos-s-South-Wall>

b) Factum Foundation. (Sin fecha). Digital reconstruction of the colour of the South wall. [Imagen]. Recuperado de <http://www.factumfoundation.org/pag/209/Tutankhamun-apos-s-South-Wall>

c) Factum Foundation. (Sin fecha). The reconstruction of the South wall materialised. [Fotografía]. Recuperado de <http://www.factumfoundation.org/pag/209/Tutankhamun-apos-s-South-Wall>

Fig. 245. Factum Foundation. (Sin fecha). Sin título. [Fotografía]. Recuperado de <http://www.factumfoundation.org/pag/209/Tutankhamun-apos-s-South-Wall>

Fig. 246. a) Williams, N. & Williams, G. / Tate. (Sin fecha). Naum Gabo. Construction in Space (Crystal) 1937–9. [Fotografía]. Recuperado de <http://www.tate.org.uk/art/artworks/gabo-construction-in-space-crystal-t06978>

b) Williams, N. (2007). Probe data information for Construction in Space 'Crystal'. [Fotografía]. Recuperado de <http://www.tate.org.uk/research/publications/tate-papers/08/tate-sculpture-replica-project>

c) y d) Williams, N. (2007). Construction in Space 'Crystal' coloured to show the different sections from which this sculpture has been constructed. [Fotografía]. Recuperado de <http://www.tate.org.uk/research/publications/tate-papers/08/tate-sculpture-replica-project>

Fig. 247. Factum Arte / Museo del Prado. (Sin fecha). Sin título. [Fotografías]. Recuperado de <http://www.factum-arte.com/pag/696/Lucida>

Fig. 248. Factum Arte/ Museo del Prado. (2016). Sin título. [Fotografía]. Recuperado de <http://www.factum->

arte.com/lib/kcfinder/upload/files/Lucida/manuals/web_lucida_A5_withcover_jan2016.pdf

Fig. 249. Factum Arte/ Museo del Prado. (2016). *Sin título*. [Fotografía]. Recuperado de http://www.factum-arte.com/lib/kcfinder/upload/files/Lucida/manuals/web_lucida_A5_withcover_jan2016.pdf

Fig. 250. Factum Arte/ Museo del Prado. (2016). *The Hereford Mappa Mundi (c. 1300, 159 x 134 cm) is one of the world's unique medieval treasures y The plaster cast reproduction of the surface turned the Mappa Mundi into a tactile object: the mapping of a map*. [Fotografías]. Recuperado de http://www.factum-arte.com/lib/kcfinder/upload/files/Lucida/manuals/web_lucida_A5_withcover_jan2016.pdf

Fig. 251. Factum Arte. (2003). *La Dama de Elche (Siglo IV AC) y La Dama de Elche (mayo 2003 DC)*. [Fotografías]. Recuperado de http://factum-arte.com/publications_PDF/Dama_elche_spanish.pdf

Fig. 252. Factum Arte. (Sin fecha). *Sin título*. [Fotografía]. Recuperado de <http://www.factum-arte.com/pag/295/-p-Facs-iacute-mil-de-em--Las-Bodas-de-Can-aacute---em--de-Paolo-Veronese--p->

Fig. 253. 20Minutos. (2016). *Reproducción en 3-D del busto de Nefertiti*. [Fotografía]. Recuperado de <http://www.20minutos.es/noticia/2681086/0/nefertiti/copia-3d/codigo-libre/#xtor=AD-15&xts=467263>

Fig. 254. Nicolai Nelles, J. (2016). *Nora al-Badri and Jan Nikolai Nelles with a 3-D printed copy of a bust Queen Nefertiti they brought to Cairo*. [Fotografía]. Recuperado de <https://www.nytimes.com/2016/03/02/arts/design/other-nefertiti-3d-printer.html?mcubz=0>

Fig. 255. Museo del Prado. (Sin fecha). Nerón y Séneca, de Eduardo Barrón. Después de su restauración y Réplica de Nerón y Séneca, de Eduardo Barrón, en Córdoba.

[Fotografías]. Recuperado de <https://www.museodelprado.es/aprende/investigacion/estudios-y-restauraciones/recurso/restauracion-de-neron-y-seneca-de-eduardo-barron/8dca97e3-f96c-4c09-8d6b-76aecb06c229>

Fig. 256. Factum Arte. (2016). Polittico Griffoni, one of the suggested reconstructions indicating the relative position of the panels. [Fotografía].

Recuperado de http://www.factum-arte.com/lib/kcfinder/upload/files/Lucida/manuals/web_lucida_A5_withcover_jan2016.pdf

Fig. 257. Factum Arte. (2016). Ercole de'Roberti, Saint George, c. 1472, 26.3 x 9.3 cm, Fondazione Giorgio Cini, Venice, front and back; Bottom: 3D renders generated by Lucida, front and back. [Fotografías].

Recuperado de http://www.factum-arte.com/lib/kcfinder/upload/files/Lucida/manuals/web_lucida_A5_withcover_jan2016.pdf

Fig. 258. a); b) y c). Factum Arte. (Sin fecha). Sin título. [Fotografía]. Recuperado de <http://www.factum-arte.com/pag/296/-p-La-reconstrucci-oacute-n-del-extremo-oriental-del-la-sala-del-trono-de-Asurnasirpal-II--p->

Fig. 259. a 263. Acosta Malo, M. J. / Museos de la Región de Murcia. (Sin fecha). V El Dibujo Arqueológico. [Ilustraciones]. Recuperado de http://www.museosdemurcia.com/museos.material_didactico?museo=museo-de-arte-ib%E9rico-el-cigarralejo-de--mula&id=5

Fig. 264. López Fraile, F. J. (2007). Dibujo tradicional plato sigillata 2) Modelo 3D textura sigillata 3) Modelo 3D textura vidrio. [Ilustraciones]. Recuperado de https://www.academia.edu/1361731/La_infograf%C3%ADa_3D_como_sistema_de_documentaci%C3%B3n_y_divulgaci%C3%B3n

Fig. 265. Callieri, M., Ponchio, F., Cignoni, P. & Scopigno, R. (2008). *User interface of the Inspector tool, showing the Arrigo VII mesh*. [Imagen]. doi: 10.1109/MCG.2008.20

Fig. 266. Museo Nacional del Prado. (Sin fecha). *La Fragua de Vulcano*. [Captura de pantalla]. Recuperado de <https://www.museodelprado.es/coleccion/obra-de-arte/la-fragua-de-vulcano/84a0240d-b41a-404d-8433-6e4e2efd21ab>

Fig. 267. a) Néstor F. Marqués / Museo Arqueológico. (2016). *Lecane con escena de Gigantomaquia*. [Captura de pantalla]. Recuperado de <https://sketchfab.com/models/6f580630ef9643418374ea850d501f91>

b) Néstor F. Marqués / Museo Arqueológico. (2016). *Crátera ática con escena dionisiaca*. [Captura de pantalla]. Recuperado de <https://sketchfab.com/models/69d164f35fa74848893d7abca16c76f9>

Fig. 268. Martín Leronés, P., Llamas Fernández, J.M, Perán, J. R. (2013). *Secuencia de imágenes de la etapa Barroca de la videoproyección 3D y Evolución de la policromía de la etapa Renacentista*. [Fotografías]. Recuperado de <http://www.jcyl.es/web/jcyl/binarios/613/71/actasAR&PA2012.pdf>

Fig. 269. Smele / Google Maps. (2017). *Sin título*. [Captura de pantalla]. Recuperado de [https://www.google.es/maps/place/Stonehenge/@51.17889,-1.8252778,3a,43.4y,31.45h,88.03t/data=!3m8!1e1!3m6!1s-478QlcHK1ZU%2FWG-VgRmzuyI%2FAAAAAAAD0OA%2Ft28GK5vYI24IRvmhEewKj_3GVDDnVTeACLIB!2e4!3e11!6s%2F%2F!h6.googleusercontent.com%2F-478QlcHK1ZU%2FWG-VgRmzuyI%2FAAAAAAAD0OA%2Ft28GK5vYI24IRvmhEewKj_3GVDDnVTeACLIB!2e4!3e11!6s%2F%2F!h6.googleusercontent.com%2F-478QlcHK1ZU%2FWG-VgRmzuyI%2FAAAAAAAD0OA%2Ft28GK5vYI24IRvmhEewKj_3GVDDnVTeACLIB%2Fw203-h100-k-no-pi-5.229167-ya342.4375-ro-0-fo100%2F!7i9728!8i4864!4m12!1m6!3m5!1s0x0:0x979170e2bcd3d2dd!2sStonehenge!8m2!3d51.178882!4d-1.826215!3m4!1s0x0:0x979170e2bcd3d2dd!8m2!3d51.178882!4d-1.826215!6m1!1e1,](https://www.google.es/maps/place/Stonehenge/@51.17889,-1.8252778,3a,43.4y,31.45h,88.03t/data=!3m8!1e1!3m6!1s-478QlcHK1ZU%2FWG-VgRmzuyI%2FAAAAAAAD0OA%2Ft28GK5vYI24IRvmhEewKj_3GVDDnVTeACLIB!2e4!3e11!6s%2F%2F!h6.googleusercontent.com%2F-478QlcHK1ZU%2FWG-VgRmzuyI%2FAAAAAAAD0OA%2Ft28GK5vYI24IRvmhEewKj_3GVDDnVTeACLIB%2Fw203-h100-k-no-pi-5.229167-ya342.4375-ro-0-fo100%2F!7i9728!8i4864!4m12!1m6!3m5!1s0x0:0x979170e2bcd3d2dd!2sStonehenge!8m2!3d51.178882!4d-1.826215!3m4!1s0x0:0x979170e2bcd3d2dd!8m2!3d51.178882!4d-1.826215!6m1!1e1,)

Fig. 271. a) Samsung. (Sin fecha). Sin título. [Fotografía]. Recuperado de
<http://www.samsung.com/es/consumer/mobile-devices/wearables/gear/SM-R320NPWAPHE>

b) Play Station VR. (Sin fecha). *Sin título R.* [Fotografía]. Recuperado de
<https://www.playstation.com/es-es/explore/playstation-vr/>

c) OculusRift. (Sin fecha). *Sin título.* [Fotografía]. Recuperado de
<http://www.vg247.com/2014/03/25/oculus-rift-bought-by-facebook-for-2-billion/>

Fig. 272. VR Google. (Sin fecha). Sin título. [Fotografías]. Recuperado de
<https://vr.google.com/cardboard/index.html>

Fig. 273. Archeoguide. (2001). Templo de Hera en Olimpia. Imagen real (izq.) e imagen aumentada (dcha.) con la reconstrucción virtual del templo que el usuario vería a través de las gafas de Realidad Aumentada. [Fotografía e imagen].
 Recuperado de
<http://www.revistadepatrimonio.es/revistas/numero8/difusion/estudios2/articulo.php>

Fig. 274. Balawat. (2017). Recreación de la ciudad completa de Segóbriga y Recreación virtual de cómo pudo ser el teatro romano de Segóbriga. [Imágenes].
 Recuperado de <https://latunicadeneso.wordpress.com/2017/03/17/el-teatro-romano-de-segobriga-recupera-de-forma-virtual-todo-su-esplendor/>

Fig. 275. Reilly, P. (Sin fecha). Sin título. [Captura de pantalla]. Recuperado de
<https://vimeo.com/170699480>

Fig. 276. Guidia, G., Russob, M. & Angheleddua, D. / Elsevier. 3D. (2014). Survey and virtual reconstruction of archeological sites. [Captura de pantalla]. doi:
<https://doi.org/10.1016/j.daach.2014.01.001>

Fig. 277. Google Arts & Culture / Musée d'Orsay. (Sin fecha). Musée d'Orsay, Paris. [Captura de pantalla].
 Recuperado de

https://www.google.com/culturalinstitute/beta/streetview/mus%C3%A9-d%E2%80%99orsay-paris/KQEnDge3UJkVmw?sv_h=289.10927981835886&sv_p=-4.304805389544299&sv_pid=FjndSjvl55w81vbNYu5DfA&sv_lid=6004477680878644429&sv_lng=2.327089926444387&sv_lat=48.85968476784497&sv_z=1

Fig. 278. Google / British Museum. (Sin fecha). *The British Museum*. [Captura de pantalla]. Recuperado de https://www.google.co.uk/maps/@51.5190601,-0.1277005,2a,90y,261.66h,62.87t/data=!3m6!1e1!3m4!1s7C9PL0HIZSi24Pg-rV3_sw!2e0!7i13312!8i6656?hl=en

Fig. 279. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte / Museo Sefardí. (Sin fecha). *Museo Sefardí*. [Captura de pantalla]. Recuperado de <http://www.mcu.es/visitavirtualmuseos/museo-sefardi>

Fig. 280. Loscos, C., Tecchia, F., Frisoli, A., Carrozzino, M., Ritter, H., Swapp, D. & Bergamascon M. (2004). *Left: Model of the Museum of Pure Form. Right: Example of a room of the museum with a statue displayed*. [Imagen]. doi: <http://dx.doi.org/10.2312/VAST/VAST04/271-279>

Fig. 281. Loscos, C., Tecchia, F., Frisoli, A., Carrozzino, M., Ritter, H., Swapp, D. & Bergamascon M. (2004). *Left: The mesh as scanned with the 3D scanners technology. Middle: The simplified mesh. Right: The simplified mesh as rendered*. [Imagen]. doi: <http://dx.doi.org/10.2312/VAST/VAST04/271-279>

Fig. 282. Loscos, C., Tecchia, F., Frisoli, A., Carrozzino, M., Ritter, H., Swapp, D. & Bergamascon M. (2004). *The Museum of Pure Form tested in the ReaCToR. The user touches the statue via a two-point-contact haptic device mounted on an exoskeleton*. [Fotografía]. doi: <http://dx.doi.org/10.2312/VAST/VAST04/271-279>

Fig. 283. a) Museo Tiflológico. (Sin fecha). *Acueducto de Segovia*. [Fotografía]. Recuperado de <http://museo.once.es/home.cfm?id=42&nivel=1&detallep=10>

b) Museo Tiflológico. (Sin fecha). *Taj Mahal*. [Fotografía]. Recuperado de <http://museo.once.es/home.cfm?id=42&nivel=1&detallep=47>

Fig. 284. a) Maquetas Arsanz. (Sin fecha). *Vista general*. [Imagen]. Recuperado de http://www.maquetasarsanz.com/linked/maqueta_tiflogica_basilica_catedral_pilar_zaragoza_museo_once_vista_general3.jpg

b) Maquetas Arsanz. (Sin fecha). *Fachada principal*. [Fotografía]. Recuperado de http://www.maquetasarsanz.com/linked/maqueta_tiflogica_basilica_catedral_pilar_zaragoza_museo_once_fachada_principal3.jpg

c) Maquetas Arsanz. (Sin fecha). *Cúpulas*. [Fotografía]. Recuperado de http://www.maquetasarsanz.com/linked/maqueta_tiflogica_basilica_catedral_pilar_zaragoza_museo_once_cupulas.jpg

Fig. 285. a) Ministerio de Educación, Cultura y Deporte / Museo Arqueológico Nacional. (Sin fecha). *Sin título*. [Fotografía]. Recuperado de <http://www.man.es/man/visita/accesibilidad.html>

b) Rubio, M. J y Fernández Tapia, D. (2014). *Pictograma colocado en todas las estaciones que invita a los visitantes a tocar los objetos expuestos*. [Imagen]. Recuperado de <http://www.man.es/man/dms/man/estudio/publicaciones/boletin-man/MAN-Bol-2014/BOL-MAN-32-2014.pdf>

Fig. 286. Arenas, P. / 20minutos.es. (2015). *Arte con las manos*. [Fotografía]. Recuperado de <http://www.20minutos.es/noticia/2350985/0/cuadros-para-ciegos/obras-maestras/museo-prado/#xtor=AD-15&xts=467263>

Fig. 288. Tactile Picture Books Project. (Sin fecha). *Sin título*. [Fotografías]. Recuperado de <https://tactilepicturebooks.org/index.html>

Fig. 289. Stanco, F., Tanasi, D., Allegra, D., Milotta, F. L. M., Lamagna, G. & Monterosso, G. (2017). *Screenshot of the web platform for the virtual interaction with the kouros of Leontinoi*. [Imagen]. doi: 10.1117/1.JEI.26.1.011025

Fig. 290. Stanco, F., Tanasi, D., Allegra, D., Milotta, F. L. M., Lamagna, G. & Monterosso, G. (2017). *3-D Systems Touch 3-D stylus y Touch interaction with the digital model of the statue through haptic technology*. [Fotografías]. doi: 10.1117/1.JEI.26.1.011025

Fig. 291. Stanco, F., Tanasi, D., Allegra, D., Milotta, F. L. M., Lamagna, G. & Monterosso, G. (2017). *3-D print of the head and the torso y Reassembled replica of the kouros of Leontinoi*. [Fotografías]. doi: 10.1117/1.JEI.26.1.011025

Fig. 292. Afp. (2015). *Destrucción del museo y la biblioteca de Mosul*. [Fotografía]. Recuperado de <http://www.elmundo.es/internacional/2015/02/27/54efc05e268e3e6c048b4576.html>

Fig. 293. Coughenour C. (2016). *Sin título*. [Capturas de pantalla]. Recuperado de <http://www.tedxhamburg.de/chance-coughenour-how-to-crowdsource-the-reconstruction-of-lost-heritage>

Fig. 294. Project Mosul. (Sin fecha). *Rekrei*. [Capturas de pantalla]. Recuperado de <https://projectmosul.org/>

Fig. 295. Coughenour C. (2016). *Sin título*. [Capturas de pantalla]. Recuperado de <http://www.tedxhamburg.de/chance-coughenour-how-to-crowdsource-the-reconstruction-of-lost-heritage>

Fig. 296. Project Mosul. (Sin fecha). *Sin título*. [Captura de pantalla]. Recuperado de <https://projectmosul.org/>

Fig. 297. Factum Foundation. (Sin fecha). *High Resolution Image Viewer*. [Capturas de pantalla]. Recuperado de <http://www.factumfoundation.org/pag/210/High-Resolution-Image-Viewer>

Fig. 298. Jiménez, J. G., García, M., Revelles, J. y Melero, F. J. (2012). *Digitalización Patrimonio Mueble y Digitalización de Patrimonio Inmueble con escáner Faro LS*. [Fotografías]. Doi: <https://doi.org/10.4995/var.2012.4386>

Fig. 299. Atalaya 3D. (Sin fecha). *Relicario de San Francisco Javier*. [Captura de pantalla]. Recuperado de <http://atalaya3d.ugr.es/obra?id=68&nombre=relicario-de-san-francisco-javier>

Fig. 300. a) Marqués, F. N. (Sin fecha). *Sin título*. [Fotografía]. Recuperado de <http://nestormarques.com/tecnologia-nueva-colecciones-antiguas/>

b) Marqués, F. N. / Real Academia de Bellas Artes de San Fernando. (Sin fecha). *Herma de Júpiter*. [Captura de pantalla]. Recuperado de <http://nestormarques.com/tecnologia-nueva-colecciones-antiguas/>

c) Marqués, F. N. / Museo Archeologico Nazionale di Napoli. (Sin fecha). *Busto de Eracle tipo Lansdowne 5594*. [Captura de pantalla]. Recuperado de <http://nestormarques.com/tecnologia-nueva-colecciones-antiguas/>

Fig. 301. Zapatero, D. (2007). *Sin título*. [Imágenes]. Recuperado de biblioteca.ucm.es/tesis/bba/ucm-t29925.pdf

Fig. 302. Unesco (Sin fecha). *Sin título*. [Imagen]. Recuperado de <https://es.unesco.org/>

Fig. 303. Logo Computer Applications & Quantitative Methods in Archaeology. (Sin fecha). *Sin título*. [Imagen]. Recuperado de <http://caa-international.org/>

Fig. 304. ClfA. (Sin fecha). *Sin título*. [Imagen]. Recuperado de <https://www.archaeologists.net/>

Fig. 305. Seav. (Sin fecha). *Sin título*. [Imagen]. Recuperado de <http://www.arqueologiavirtual.com/>

Fig. 306. Innova. (Sin fecha). Sin título. [Imagen]. Recuperado de <http://virtualarchaeology.net>

Fig. 307. La opinión de Málaga.es. (2012). *El escándalo del viaje a la luna de Torremolinos*. [Fotografía]. Recuperado de <http://www.laopiniondemalaga.es/malaga/2012/03/10/escandalo-viaje-luna-torremolinos/491591.html>

Fig. 308. Seav. (Sin fecha). Sin título. [Imagen]. Recuperado de <http://www.arqueologiavirtual.com/carta/>

Fig. 309. U.S. Department of Justice. (2010). Sin título. [Fotografía]. Recuperado de <http://latimesblogs.latimes.com/lanow/2010/04/westside-art-dealer-agrees-to-plea-deal-in-sale-of-2-million-fake-picasso.html>

Fig. 310. a) Fälschermuseum Wien. (Sin fecha). *Copy of the Judith I by Gustav Klimt (1862-1918)*. [Fotografía]. Recuperado de <http://www.faelschermuseum.com/Pages/Kopien/Copy.htm>

b) Colección MACE, Ajuntament d'Eivissa. (2013). *A la manera de Degas*. [Fotografía]. Recuperado de http://www.circulobellasartes.com/wp-content/uploads/2016/04/Proyecto__Fake__Elmyr__de__Hory_9617.pdf

c) Colección Branger. (2013). *A la manera de Léger (Hommage à Fernand Léger)*. [Fotografía]. Recuperado de http://www.circulobellasartes.com/wp-content/uploads/2016/04/Proyecto__Fake__Elmyr__de__Hory_9617.pdf

Fig. 312. a) Berger et al. (2015). *Holotype specimen of Homo naledi, Dinaledi Hominin 1 (DH1)*. [Fotografía]. doi: <https://doi.org/10.7554/eLife.09560.019>

b) Berger et al. (2015). *Dinaledi skeletal specimens*. [Fotografía]. doi: <https://doi.org/10.7554/eLife.09560.003>

Fig. 313. Morpho Source. (2015). *Media: M7300*. [Captura de pantalla]. Recuperado de http://morphosource.org/Detail/MediaDetail/Show/media_id/7300

Fig. 338. Rosillo, C. (2016). *Cráneo de un ejemplar de 'Homo Naledi', homínido descubierto en 2015, expuesto en el Museo Nacional de Ciencias*. [Fotografía]. Recuperado de http://ccaa.elpais.com/ccaa/2016/11/10/madrid/1478807071_348442.html

Fig. 339. Wiley-Liss. (2005). *Neanderthal reconstruction (left) next to a modern human skeleton for comparison*. [Fotografía]. doi: 10.1002/ar.b.20057

Fig. 340. Bone Clones, Inc. (2007). *Neanderthal Skeleton Articulated*. [Fotografía]. Recuperado de <https://boneclones.com/product/neanderthal-skeleton-articulated-SC-019-A>

Fig. 341. Bastir, M., García-Martínez, D., Estalrich, A., García-Tabernero, A., Huguet, R., Ríos, L., Barash, A., Recheis, W., Rasilla, M. & Rosas, A. (2015). *Cranial views of Neandertals from El Sidr on compared with modern humans*. [Fotografía]. doi: 10.1016/j.jhevol.2014.10.008

Fig. 354. [Fotografía de Markus Bastir]. (Nueva Orleans, LA. Abril de 2017).

Fig. 355. Schiess & Haeusler. (2013). *Presacral vertebrae in dorsal and sagittal view of KNM-WT 15000*. [Imágenes]. doi: 10.1002/ajpa.22211

Fig. 356. Anatolandia. (2013). *Sin título*. [Imagen]. Recuperado de <https://www.anatolandia.com/2013/10/columna-vertebral-articulaciones.html>

Fig. 365. Riesco López, A. (2017). *Sección del CT-Scan del individuo europeo*. [Imagen]. Recuperado de Riesco, A. (2017). *Métodos cuantitativos para la reconstrucción de la columna vertebral torácica en anatomía evolutiva humana* (Trabajo fin de Máster). Universidad Complutense de Madrid y Universidad de Alcalá, Madrid.

Fig. 366. Riesco López, A. (2017). Segmentación de una vértebra torácica con respecto al resto en el individuo europeo. [Imagen]. Recuperado de Riesco, A. (2017). Métodos cuantitativos para la reconstrucción de la columna vertebral torácica en anatomía evolutiva humana (Trabajo fin de Máster). Universidad Complutense de Madrid y Universidad de Alcalá, Madrid.

Fig. 367. Riesco López, A. (2017). Resultado de la segmentación de las columnas torácicas originales. [Imagen]. Recuperado de Riesco, A. (2017). Métodos cuantitativos para la reconstrucción de la columna vertebral torácica en anatomía evolutiva humana (Trabajo fin de Máster). Universidad Complutense de Madrid y Universidad de Alcalá, Madrid.

Fig. 368. Riesco López, A. (2017). Reconstrucciones virtuales del individuo africano. [Imagen]. Recuperado de Riesco, A. (2017). Métodos cuantitativos para la reconstrucción de la columna vertebral torácica en anatomía evolutiva humana (Trabajo fin de Máster). Universidad Complutense de Madrid y Universidad de Alcalá, Madrid.

Fig. 369. Riesco López, A. (2017). Reconstrucciones virtuales del individuo europeo. [Imagen]. Recuperado de Riesco, A. (2017). Métodos cuantitativos para la reconstrucción de la columna vertebral torácica en anatomía evolutiva humana (Trabajo fin de Máster). Universidad Complutense de Madrid y Universidad de Alcalá, Madrid.

Fig. 372. Riesco López, A. (2017). Método M3. [Imagen]. Recuperado de Riesco, A. (2017). Métodos cuantitativos para la reconstrucción de la columna vertebral torácica en anatomía evolutiva humana (Trabajo fin de Máster). Universidad Complutense de Madrid y Universidad de Alcalá, Madrid.

Fig. 373. Riesco López, A. (2017). Método M4. [Imagen]. Recuperado de Riesco, A. (2017). Métodos cuantitativos para la reconstrucción de la columna vertebral torácica en anatomía evolutiva humana (Trabajo fin de Máster). Universidad Complutense de Madrid y Universidad de Alcalá, Madrid.

Fig. 375. Riesco López, A. (2017). *Método M5, empleando adhesivo en los espacios intervertebrales a modo de discos intervertebrales*. [Imagen]. Recuperado de Riesco, A. (2017). Métodos cuantitativos para la reconstrucción de la columna vertebral torácica en anatomía evolutiva humana (Trabajo fin de Máster). Universidad Complutense de Madrid y Universidad de Alcalá, Madrid.

Fig. 376. Riesco López, A. (2017). *Columna torácica del niño de Nariokotome reconstruida virtualmente (M6)*. [Imagen]. Recuperado de Riesco, A. (2017). Métodos cuantitativos para la reconstrucción de la columna vertebral torácica en anatomía evolutiva humana (Trabajo fin de Máster). Universidad Complutense de Madrid y Universidad de Alcalá, Madrid.

Fig. 377. Riesco López, A. (2017). *Medición del ángulo de Cobb para conocer la máxima desviación existente en la columna torácica del individuo actual africano*. [Imagen]. Recuperado de Riesco, A. (2017). Métodos cuantitativos para la reconstrucción de la columna vertebral torácica en anatomía evolutiva humana (Trabajo fin de Máster). Universidad Complutense de Madrid y Universidad de Alcalá, Madrid.

Fig. 381. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 382. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 383. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 384. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 385. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 386. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 387. [Fotografía de Rita Gil Macarrón]. (Madrid. 2014).

Fig. 388. [Fotografía de Rita Gil Macarrón]. (Madrid. 2014).

Fig. 389. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 390. Espinel, J. C. (2016). *Escala de grises e Imagen obtenida al superponer los niveles o capas del relieve con máscara que se muestran en la Figura 18.* [Imágenes]. Recuperado de <http://eprints.ucm.es/38940/1/T37730.pdf>

Fig. 391. Espinel, J. C. (2016). *División de la imagen en 7 niveles de profundidad y Displacement al aplicar la imagen a 500 ppp.* [Imágenes]. Recuperado de <http://eprints.ucm.es/38940/1/T37730.pdf>

Fig. 392. [Fotografía de José Carlos Espinel]. (Madrid. 2014).

Fig. 393. [Fotografía de Fátima Marcos-Fernández].

Fig. 394. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 395. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 396. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 397. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 398. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 399. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 400. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 401. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 402. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 403. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 404. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 405. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 406. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 407. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 408. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 409. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 410. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 411. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 412. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 413. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 414. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 415. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 440. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 441. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 442. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 443. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 444. [Fotografía de José Carlos Espinel]. (Madrid. 2014).

Fig. 445. a) Santos, S. (2015). *Sin título*. [Captura de pantalla]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=HjlsfFmXspk>

b) Santos, S. (2015). *Sin título*. [Captura de pantalla]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=SNOWKOQ0jEg>

Fig. 446. Miner, M. (2011). *Anna Hyatt Huntington*. [Fotografía]. Recuperado de <http://marciaminersroomwithaview.blogspot.com.es/2011/10/anna-hyatt-huntington.html>

Fig. 447. Santos, F. M. (Sin fecha). *La antorcha de la escultora norteamericana Ana Huntington, desembalada en la ciudad universitaria*. [Fotografía]. Recuperado de http://open.ieec.uned.es/HussoDigital/?page_id=187

Fig. 448. Santos Yubero, F. M. (Sin fecha). *Ciudad Universitaria. Chicas estudiantes en la antorcha*. [Fotografía]. Recuperado de http://open.ieec.uned.es/HussoDigital/?page_id=187

Fig. 449. [Fotografías de Montaña Galán Caballero]. (Madrid. 2010).

Fig. 450. [Fotografías de Montaña Galán Caballero]. (Madrid. 2010).

Fig. 451. a) [Fotografía de Carlos Romero Barruet]. (Madrid, 2010).

b) [Fotografía de Montaña Galán Caballero]. (Madrid. 2010).

Fig. 452. [Fotografías de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 453. [Fotografías de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2014).

Fig. 454. [Fotografías de Santiago Tena]. (Madrid. 2014).

Fig. 455. a) [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid, 2014).

b) [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Valencia, 2015).

Fig. 456. a) [Fotografía de Carlos Romero Barruet]. (Madrid, 2010).

Fig. 457. [Fotografías de Montaña Galán Caballero]. (Valencia. 2015).

Fig. 458. [Fotografías de Montaña Galán Caballero]. (Valencia. 2015).

Fig. 459. [Fotografías de Montaña Galán Caballero]. (Valencia. 2015).

Fig. 463. [Fotografía de Sandy O'Reily / Mark TwainLibrary]. (Connecticut. 2015).

Fig. 464. [Fotografía de Melanie Neil]. (Virginia. 2015).

Fig. 465. Miner, M. (2011). *Sin título.* [Fotografía]. Recuperado de <http://marciaminersroomwithaview.blogspot.com.es/2011/10/anna-hyatt-huntington.html>

Fig. 466. Ceosgol. (Sin fecha). *Sin título.* [Fotografía]. Recuperado de <http://mapio.net/pic/p-105224679/>

Fig. 467. [Fotografía de Carlos Romero Barruet]. (Madrid, 2010).

Fig. 475. [Fotografía de Carlos Romero Barruet]. (Madrid, 2010).

Fig. 478. [Fotografía de Carlos Romero Barruet]. (Madrid, 2010).

Fig. 479. [Fotografías de Pablo de Arriba del Amo]. (Madrid, 2016).

Fig. 481. a) [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2016).

b) [Fotografía de Guillermo Quirós Carretero]. (Madrid. 2016).

Fig. 482. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2016).

Fig. 483. [Fotografías de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2016).

Fig. 495. [Fotografías de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2017).

Fig. 496. [Fotografías de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2017).

Fig. 497. [Fotografías de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2017).

Fig. 498. [Fotografía de Lucio Zurdo]. (Madrid. 2017).

Fig. 499. [Fotografías de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2017).

Fig. 500. [Fotografías de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2017).

Fig. 501. [Fotografías de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2017).

Fig. 502. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2017).

Fig. 503. [Fotografía de Lucio Zurdo]. (Madrid. 2017).

Fig. 504. [Fotografías de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2017).

Fig. 505. [Fotografía de Guillermo Quirós Carretero]. (Madrid. 2017).

Fig. 506. [Fotografías de Lucio Zurdo]. (Madrid. 2017).

Fig. 507. [Fotografías de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2017).

Fig. 508. [Fotografías de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2017).

Fig. 509. [Fotografías de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2017).

Fig. 510. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2017).

Fig. 511. [Fotografías de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2017).

Fig. 512. [Fotografías de Guillermo Quirós Carretero]. (Madrid. 2017).

Fig. 513. [Fotografías de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2017).

Fig. 514. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2017).

Fig. 515. [Fotografías de Guillermo Quirós Carretero]. (Madrid. 2017).

Fig. 516. De Miguel, J. (2017). *Imagen de la estatua el pasado miércoles 29 de marzo, antes de descubrirse la antorcha que había sido instalada la tarde anterior.* [Fotografía]. Recuperado de <http://www.tribuna.ucm.es/193/art2720.php#.WuCYxIhubIV>

Fig. 517. De Miguel, J. (2017). *Manuela Carmena tuvo que irse a otro acto antes de visitar la escultura Los portadores de la Antorcha y en su lugar posó un representante del Ayuntamiento junto a los rectores y la presidenta.* [Fotografía]. Recuperado de <http://tribuna.ucm.es/192/art2710.php#.WuCbGYhubIV>

Fig. 518. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2017).

Fig. 519. [Fotografía de Sonia Santos Gómez]. (Madrid. 2017).

Fig. 520. [Fotografía de Guillermo Quirós Carretero]. (Madrid. 2017).

Fig. 521. [Fotografías de Guillermo Quirós Carretero]. (Madrid. 2017).

Fig. 522. Santos S. (2018). *Video realización reproducción los portadores de la antorcha.* [Captura de pantalla]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=9296qPdNpoE>

Fig. 534. Amazon. (Sin fecha). *Sin título.* [Fotografía]. Recuperado de <https://www.amazon.de/INTEY-LED-Beleuchtung-einstellbares-professionelles-Makro-Objektiv-schwarz/dp/B01MXF1VMR>

Fig. 535. [Fotografías de Mireya Arenas Patiño]. (Madrid. 2018).

Fig. 577. [Fotografías de Francisco Javier Fernández Pérez]. (Madrid. 2018).

Fig. 578. [Fotografías de Francisco Javier Fernández Pérez]. (Madrid. 2018).

Fig. 579. [Fotografías de Francisco Javier Fernández Pérez]. (Madrid. 2018).

Tablas

Tabla 1. Matía M. (2009). *Clasificación de los moldes*. [Tabla]. Recuperado de Reproductibilidad. En Tres Cantos (Eds.), *Procedimientos y materiales en la obra escultórica* (pp. 99-132). Madrid, España: Akal.

Tabla 2. Ardila J. G. (2007). *Historia del desarrollo de la manufactura por capas*. [Tabla]. Recuperado de <http://www.ilustrados.com/documentos/manufactura-capas-prototipado-rapido-050208.pdf>

Tabla 4. Riesco López, A. (2017). *Distancias procrustes de cada una de las 5 reconstrucciones realizadas en cada individuo con respecto a la columna original*. [Imagen]. Recuperado de Riesco, A. (2017). *Métodos cuantitativos para la reconstrucción de la columna vertebral torácica en anatomía evolutiva humana* (Trabajo fin de Máster). Universidad Complutense de Madrid y Universidad de Alcalá, Madrid.

Tabla 5. Riesco López, A. (2017). *Lista de distancias procrustes de distintas reconstrucciones realizadas en cada individuo con respecto a la columna original y con respecto al método M5*. [Imagen]. Recuperado de Riesco, A. (2017). *Métodos cuantitativos para la reconstrucción de la columna vertebral torácica en anatomía evolutiva humana* (Trabajo fin de Máster). Universidad Complutense de Madrid y Universidad de Alcalá, Madrid.

